



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**“ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y  
DISPONIBILIDAD (CMD) DEL SISTEMA DE REINYECCIÓN DE  
AGUA DE FORMACIÓN DE LA EMPRESA PETROAMAZONAS  
EP, BLOQUE 18 ZPF, ORELLANA-ECUADOR”**

**DIEGO ERNESTO PAZMIÑO MORALES**

Proyecto de investigación presentado ante el Instituto de Postgrado y Educación  
Continua de la ESPOCH como requisito parcial para la obtención del grado de:

**MAGISTER EN GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

**RIOBAMBA - ECUADOR**

**JULIO 2018**

## CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Proyecto de Investigación, titulado “ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD (CMD) DEL SISTEMA DE REINYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN DE LA EMPRESA PETROAMAZONAS EP, BLOQUE 18 ZPF, ORELLANA-ECUADOR” de responsabilidad del Sr. DIEGO ERNESTO PAZMIÑO MORALES ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

_____ Dr. Patricio Noboa <b>PRESIDENTE</b>	_____ FIRMA
_____ Ing. Washington Zabala; M.Sc <b>DIRECTOR</b>	_____ FIRMA
_____ Ing. Marco Santillán; M.Sc <b>MIEMBRO</b>	_____ FIRMA
_____ Ing. Jorge Freire; M.Sc. <b>MIEMBRO</b>	_____ FIRMA
_____	_____ FIRMA

Riobamba, Julio 2018

## **DERECHOS INTELECTUALES**

Yo, Diego Ernesto Pazmiño Morales, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el presente Proyecto de Investigación, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

FIRMA

No. 0603204389

## **DEDICATORIA**

*Mis esfuerzos dedicados para mi esposa Isabel, mis hijos Alejandro y Emma.*

## **AGRADECIMIENTO**

*A Washington Zabala por su ayuda incondicional a lo largo de la investigación.*

*Diego*

## CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
INDICE DE TABLAS.....	xii
INDICE DE ANEXOS .....	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT .....	xvi
CAPÍTULO I	
1. EL PROBLEMA .....	1
1.1 Introducción .....	1
1.2 Problema de investigación .....	2
1.2.1. Planteamiento del Problema .....	2
1.3 Formulación del problema. ....	4
1.4 Sistematización del problema.....	4
1.5 Objetivos de la investigación .....	5
1.5.1 Objetivo general .....	5
1.5.2. Objetivos específicos .....	5
1.6 Justificación de la investigación .....	6
1.7 Hipótesis .....	7
CAPÍTULO II	
2. MARCO DE REFERENCIA .....	8
2.1 Antecedentes Investigativos.....	8
2.2. Marco Teórico .....	10
2.2.1. Introducción .....	10
2.2.2. Interacción CMD .....	11
2.2.3. Disponibilidad .....	11
2.2.4. Confiabilidad y Mantenibilidad-CMD-Estimación de $F(t)$ y $M(t)$ .....	12
2.2.5. Mantenibilidad .....	14
2.2.6. Estimación de No Confiabilidad $F(t)$ y de mantenibilidad $M(t)$ .....	17
2.2.7. Métodos de estimación de la No Confiabilidad y de la Mantenibilidad .....	18
2.2.8. Parámetros y Distribuciones –CMD- .....	19
2.2.9. Estimación de parámetros .....	19

2.2.10.	<i>Distribución de Weibull</i> .....	20
2.2.11.	<i>Distribución Normal</i> .....	24
2.2.12.	<i>Distribución LogNormal</i> .....	26
2.2.13.	<i>Pruebas de Bondad de ajuste</i> .....	27
2.2.14.	<i>Estimaciones de sistemas o equipos en serie o paralelo</i> .....	29
2.2.15.	<i>Simulación Montecarlo</i> .....	30
2.3.	<b>Marco conceptual</b> .....	30
<b>CAPÍTULO III</b>		
3.	<b>DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>34</b>
3.1.	<b>Tipo de estudio</b> .....	34
3.2.	<b>Método de investigación</b> .....	34
3.3.	<b>Población</b> .....	35
3.4.	<b>Fuentes y técnicas para recolección de datos</b> .....	35
3.5.	<b>Metodología</b> .....	36
3.5.1.	<i>Contexto Operacional del Sistema</i> .....	41
3.5.2.	<i>Obtención de Datos</i> .....	45
3.5.3.	<i>Determinación de los tiempos operativos y tiempos de reparación.</i> .....	46
3.5.4.	<i>Estimación de la no confiabilidad y mantenibilidad.</i> .....	54
3.5.5.	<i>Alineación para Weibull. Mínimo cuadrados.</i> .....	69
3.5.6.	<i>Determinación de los parámetros de Weibull <math>\beta</math> y <math>\eta</math></i> .....	74
3.5.7.	<i>Cumplimiento de las pruebas de bondad de ajuste</i> .....	78
3.6.	<b>Determinación de la confiabilidad mediante FIASOFT.</b> .....	94
3.6.1.	<i>Resultados de confiabilidad de bomba P-1501A mediante FIASOFT</i> .....	95
3.6.2.	<i>Resultados de confiabilidad de bomba P-1501B mediante FIASOFT</i> .....	97
3.6.3.	<i>Resultados de confiabilidad de bomba P-1501C mediante FIASOFT</i> .....	99
3.6.4.	<i>Resultados de confiabilidad de bomba P-1501D mediante FIASOFT</i> .....	101
3.6.5.	<i>Resultados de confiabilidad de bomba P-1501E mediante FIASOFT</i> .....	103
3.7.	<i>Funciones características de la distribución de Weibull para las bombas del sistema de reinyección de agua.</i> .....	105
3.7.1.	<i>Funciones características de la bomba P-1501A</i> .....	105
3.7.2.	<i>Funciones características de la bomba P-1501B</i> .....	106
3.7.3.	<i>Funciones características de la bomba P-1501C</i> .....	109
3.7.4.	<i>Funciones características de la bomba P-1501D</i> .....	112
3.7.5.	<i>Funciones características de la bomba P-1501E</i> .....	113
3.8.	<b>Determinación de la Disponibilidad inherente</b> .....	115

3.8.1.	<i>Disponibilidad P-1501A</i> .....	115
3.8.2.	<i>Disponibilidad P-1501B</i> .....	116
3.8.3.	<i>Disponibilidad P-1501C</i> .....	117
3.8.4.	<i>Disponibilidad P-1501D</i> .....	118
3.8.5.	<i>Disponibilidad P-1501E</i> .....	118
3.9.	Calculo de la Confiabilidad del sistema. ....	119
3.10.	Calculo de la Disponibilidad del sistema.....	128
3.11.	Análisis de estrategias.....	129

## CAPÍTULO IV

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	132
4.1.	Parámetros e índices de confiabilidad.....	132
4.2.	Curvas de los índices de Confiabilidad .....	133
4.2.1.	<i>Curvas de índices de confiabilidad de la bomba P-1501A</i> .....	133
4.2.2.	<i>Curvas de índices de confiabilidad de la bomba P-1501B</i> .....	139
4.2.3.	<i>Curvas de índices de confiabilidad de la bomba P-1501C</i> .....	142
4.2.4.	<i>Curvas de índices de confiabilidad de la bomba P-1501D</i> .....	145
4.2.5.	<i>Curvas de índices de confiabilidad de la bomba P-1501E</i> .....	148
4.2.6.	<i>Curva de índice de confiabilidad del sistema de reinyección de agua</i> .....	151
4.3.	Parámetros e índices de Mantenibilidad.....	152
4.3.1.	<i>Curvas de los índices de Mantenibilidad</i> .....	152
4.3.2.	<i>Curvas de índices de Mantenibilidad de la bomba P-1501A</i> .....	153
4.3.3.	<i>Curvas de índices de Mantenibilidad de la bomba P-1501B</i> .....	154
4.3.4.	<i>Curvas de índices de Mantenibilidad de la bomba P-1501C</i> .....	156
4.3.5.	<i>Curvas de índices de Mantenibilidad de la bomba P-1501D</i> .....	157
4.3.6.	<i>Curvas de índices de Mantenibilidad de la bomba P-1501E</i> .....	158
4.4.	Disponibilidad del sistema de reinyección de agua .....	159
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		¡Error! Marcador no definido.
CONCLUSIONES.....		161
RECOMENDACIONES.....		163

## BIBLIOGRAFÍA

## ANEXOS



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1.</b> Volumen de agua de reinyección de Palo Azul 2008-2015,.....	3
<b>Figura 2-1.</b> Curva de Confiabilidad para la distribución de Weibull con diferentes betas.....	14
<b>Figura 2-2.</b> Curva de la bañera o de Davies.....	15
<b>Figura 2-3.</b> Curva de Mantenibilidad $M(T)$ para distribución de Weibull, Ejemplo Turbina de gas.....	16
<b>Figura 3-1.</b> Modelo universal e integral, propuesto para la medición,.....	39
<b>Figura 3-2.</b> Motor eléctrico de bomba P-1501 E, .....	42
<b>Figura 3-3.</b> Bomba P-1501B, marca Sulzer, .....	43
<b>Figura 3-4.</b> Esquema del proceso para las bombas booster de agua de producción.....	44
<b>Figura 3-1.</b> Programa - Cálculo de CMD, parámetros, curvas y bondad de ajuste, Plataforma de resultados. ....	79
<b>Figura 3-2.</b> Resultados obtenidos para Confiabilidad de bomba P-1501A en software RAM (Mora 2007). ....	80
<b>Figura 3-3.</b> Resultados obtenidos para Confiabilidad de bomba P-1501B en software RAM (Mora 2007). ....	82
<b>Figura 3-4.</b> Resultados obtenidos para Confiabilidad de bomba P-1501C en software RAM (Mora 2007). ....	83
<b>Figura 3-5.</b> Resultados obtenidos para Confiabilidad de bomba P-1501D en software RAM (Mora 2007). ....	84
<b>Figura 3-6.</b> Resultados obtenidos para Confiabilidad de bomba P-1501E en software RAM (Mora 2007). ....	85
<b>Figura 3-7.</b> Resultados obtenidos para Mantenibilidad de bomba P-1501A en software RAM (Mora 2007). ....	86
<b>Figura 3-8.</b> Resultados obtenidos para Mantenibilidad de bomba P-1501B en software RAM (Mora 2007). ....	88
<b>Figura 3-9.</b> Resultados obtenidos para Mantenibilidad de bomba P-1501C en software RAM (Mora 2007). ....	90
<b>Figura 3-10.</b> Resultados obtenidos para Mantenibilidad de bomba P-1501D en software RAM (Mora 2007). ....	92
<b>Figura 3-11.</b> Resultados obtenidos para Mantenibilidad de bomba P-1501E en software RAM (Mora 2007). ....	93
<b>Figura 3-12.</b> Resultados de la confiabilidad de la bomba P-1501A. ....	95
<b>Figura 3-13.</b> Resultados de la confiabilidad de la bomba P-1501A. ....	95
<b>Figura 3-14.</b> Probabilidad de Weibull ( $\beta$ y $\eta$ ) de bomba P-1501A. ....	96
<b>Figura 3-15.</b> Resultados de la confiabilidad de la bomba P-1501B. ....	97
<b>Figura 0-16.</b> Resultados de la confiabilidad de la bomba P-1501B, .....	98
<b>Figura 0-17.</b> Probabilidad de Weibull ( $\beta$ y $\eta$ ) de bomba P-1501B. ....	98
<b>Figura 3-18.</b> Resultados de la confiabilidad de la bomba P-1501C. ....	99
<b>Figura 3-19.</b> Resultados de la confiabilidad de la bomba P-1501C, .....	99
<b>Figura 3-20.</b> Probabilidad de Weibull ( $\beta$ y $\eta$ ) de bomba P-1501C. ....	100
<b>Figura 3-21.</b> Resultados de la confiabilidad de la bomba P-1501D. ....	101
<b>Figura 3-22.</b> Resultados de la confiabilidad de la bomba P-1501D, .....	101
<b>Figura 3-23.</b> Probabilidad de Weibull ( $\beta$ y $\eta$ ) de bomba P-1501D. ....	102
<b>Figura 3-24.</b> Resultados de la confiabilidad de la bomba P-1501E. ....	103
<b>Figura 0-25.</b> Resultados de la confiabilidad de la bomba P-1501E. ....	103
<b>Figura 3-26.</b> Probabilidad de Weibull ( $\beta$ y $\eta$ ) de bomba P-1501E. ....	104
<b>Figura 3-27.</b> Tabulación de las ecuaciones de fiabilidad de la bomba P-1501A en función del tiempo con límite de 6000 horas.....	107
<b>Figura 3-28.</b> Tabulación de las ecuaciones de fiabilidad de la bomba P-1501B en función del tiempo con límite de 6000 horas.....	109

<b>Figura 3-29.</b> Tabulación de las ecuaciones de fiabilidad de la bomba P-1501C en función del tiempo con límite de 6000 horas.....	111
<b>Figura 3-30.</b> Tabulación de las ecuaciones de fiabilidad de la bomba P-1501D en función del tiempo con límite de 6000 horas.....	113
<b>Figura 3-31.</b> Tabulación de las ecuaciones de fiabilidad de la bomba P-1501E en función del tiempo con límite de 6000 horas.....	115
<b>Figura 3-32.</b> Resultados de Disponibilidad de bomba P-1501A en software RAM (Mora 2007). .....	116
<b>Figura 3-33.</b> Resultados de Disponibilidad de bomba P-1501B en software RAM (Mora 2007). .....	117
<b>Figura 3-34.</b> Resultados de Disponibilidad de bomba P-1501C en software RAM (Mora 2007). .....	117
<b>Figura 3-35.</b> Resultados de Disponibilidad de P-1501D en software RAM (Mora 2007). .....	118
<b>Figura 3-36.</b> Resultados de Disponibilidad de bomba P-1501E en software RAM (Mora 2007).....	119
<b>Figura 3-37.</b> Estructura en paralelo de las bombas P-1501, con sus parámetros de confiabilidad.....	119
<b>Figura 3-38.</b> Confiabilidad tabulada del sistema de reinyección de agua en función del tiempo hasta 6000 horas.....	121
<b>Figura 3-39.</b> Gráfico de la confiabilidad del sistema de reinyección de agua en el tiempo. ....	125
<b>Figura 3-40.</b> Software ICR y los parámetros de confiabilidad de las bombas P-1501A/B/C/D/E. ....	126
<b>Figura 3-41.</b> Software ICR. Curvas de fiabilidad de cada uno de las bombas del sistema de reinyección de agua. ....	126
<b>Figura 3-42.</b> Software ICR. Curva de fiabilidad del sistema de reinyección. ....	127
<b>Figura 3-43.</b> Software ICR. Curvas de fiabilidad del sistema y bombas de reinyección ZPF. ....	127
<b>Figura 3-44.</b> Programa-software ICR. Resultados de la simulación de la disponibilidad del sistema de reinyección de agua. ....	128
<b>Figura 3-45.</b> Programa-software ICR. Resultado gráfico de la simulación de la disponibilidad del sistema de reinyección de agua.....	129
<b>Figura 3-46.</b> Aplicación de acciones y tácticas acorde a los valores CMD y $\beta$ que se tengan.....	131
<b>Figura 4-1.</b> Fiabilidad de la bomba P-1501A.....	133
<b>Figura 4-2.</b> Desconfiabilidad de la bomba P-1501A.....	137
<b>Figura 4-3.</b> Densidad de probabilidad de falla de la bomba P-1501A. ....	137
<b>Figura 4-4.</b> Tasa de falla de la bomba P-1501A. ....	138
<b>Figura 4-5.</b> Fiabilidad de la bomba P-1501B.....	139
<b>Figura 4-6.</b> Desconfiabilidad de la bomba P-1501B.....	140
<b>Figura 4-7.</b> Densidad de probabilidad de falla de la bomba P-1501B. ....	140
<b>Figura 4-8.</b> Tasa de falla de la bomba P-1501B.....	141
<b>Figura 4-9.</b> Fiabilidad de la bomba P-1501C.....	142
<b>Figura 4-10.</b> Desconfiabilidad de la bomba P-1501C.....	143
<b>Figura 4-11.</b> Densidad de probabilidad de falla de la bomba P-1501C. ....	143
<b>Figura 4-12.</b> Tasa de falla de la bomba P-1501C.....	144
<b>Figura 4-13.</b> Fiabilidad de la bomba P-1501D.....	145
<b>Figura 4-14.</b> Desconfiabilidad de la bomba P-1501D.....	146
<b>Figura 4-15.</b> Densidad de probabilidad de falla de la bomba P-1501D. ....	146
<b>Figura 4-16.</b> Tasa de falla de la bomba P-1501D. ....	147
<b>Figura 4-17.</b> Fiabilidad de la bomba P-1501E. ....	148
<b>Figura 4-18.</b> Desconfiabilidad de la bomba P-1501E.....	149
<b>Figura 4-19.</b> Densidad de probabilidad de falla de la bomba P-1501E.....	149
<b>Figura 4-20.</b> Tasa de falla de la bomba P-1501E.....	150
<b>Figura 4-21.</b> Curva de confiabilidad del sistema de reinyección de agua ZPF Petroamazonas EP. ....	151
<b>Figura 4-22.</b> Curva de Mantenibilidad de bomba P-1501A.....	153
<b>Figura 4-23.</b> Densidad de Reparaciones de bomba P-1501A. ....	154
<b>Figura 4-24.</b> Curva de Mantenibilidad de bomba P-1501B.....	154
<b>Figura 4-25.</b> Densidad de Reparaciones de bomba P-1501B.....	155
<b>Figura 4-26.</b> Curva de Mantenibilidad de bomba P-1501C.....	156
<b>Figura 4-27.</b> Densidad de Reparaciones de bomba P-1501B.....	156
<b>Figura 4-28.</b> Curva de Mantenibilidad de bomba P-1501D.....	157

<b>Figura 4-29.</b> Densidad de Reparaciones de bomba P-1501D..	158
<b>Figura 4-30.</b> Curva de Mantenibilidad de bomba P-1501E.	158
<b>Figura 4-31.</b> Densidad de Reparaciones de bomba P-1501E.	159

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3-1.</b> Base de datos de fallas de la bomba P-1501A. ....	47
<b>Tabla 3-1.</b> Tiempos de buen funcionamiento UT y de down time DT refinados de la bomba P1501A. .	55
<b>Tabla 3-2.</b> Métodos de estimación y cálculo de la no confiabilidad de P-1501A. ....	56
<b>Tabla 3-3.</b> Métodos de estimación y cálculo de la mantenibilidad de P-1501A. ....	57
<b>Tabla 3-4</b> Métodos de estimación y cálculo de la no confiabilidad de P-1501B. ....	60
<b>Tabla 3-5</b> Métodos de estimación y cálculo de la mantenibilidad de P-1501B. ....	61
<b>Tabla 3-6</b> Métodos de estimación y cálculo de la no confiabilidad de P-1501C. ....	62
<b>Tabla 3-7</b> Métodos de estimación y cálculo de la mantenibilidad de P-1501C. ....	64
<b>Tabla 3-8</b> Métodos de estimación y cálculo de la no confiabilidad de P-1501D. ....	65
<b>Tabla 3-9</b> Métodos de estimación y cálculo de la mantenibilidad de P-1501D. ....	66
<b>Tabla 3-10</b> Métodos de estimación y cálculo de la no confiabilidad de P-1501E.....	67
<b>Tabla 3-11</b> Métodos de estimación y cálculo de la mantenibilidad de P-1501E.....	68
<b>Tabla 3-12</b> Resultados de linealizar la distribución de No Confiabilidad de la bomba P-1501A. ....	70
<b>Tabla 3-13</b> Resultados de linealizar la distribución de No Confiabilidad de la bomba P-1501B. ....	70
<b>Tabla 3-14</b> Resultados de linealizar la distribución de No Confiabilidad de la bomba P-1501C. ....	71
<b>Tabla 3-15</b> Resultados de linealizar la distribución de No Confiabilidad de la bomba P-1501D. ....	71
<b>Tabla 3-16</b> Resultados de linealizar la distribución de No Confiabilidad de la bomba P-1501E. ....	72
<b>Tabla 3-17</b> Resultados de linealizar la distribución de Mantenibilidad de la bomba P-1501A.....	72
<b>Tabla 3-18</b> Resultados de linealizar la distribución de Mantenibilidad de la bomba P-1501B.....	73
<b>Tabla 3-19</b> Resultados de linealizar la distribución de Mantenibilidad de la bomba P-1501C.....	73
<b>Tabla 3-20</b> Resultados de linealizar la distribución de No Confiabilidad de la bomba P-1501D. ....	74
<b>Tabla 3-21</b> Resultados de linealizar la distribución de No Confiabilidad de la bomba P-1501E.....	74
<b>Tabla 3-22.</b> Parámetros de la confiabilidad de la bomba P-1501A. ....	75
<b>Tabla 3-23.</b> Parámetros de la confiabilidad de la bomba P-1501B. ....	75
<b>Tabla 3-24.</b> Parámetros de la confiabilidad de la bomba P-1501C. ....	75
<b>Tabla 3-25.</b> Parámetros de la confiabilidad de la bomba P-1501D. ....	75
<b>Tabla 3-26.</b> Parámetros de la confiabilidad de la bomba P-1501E. ....	76
<b>Tabla 3-27.</b> Parámetros de la Mantenibilidad de la bomba P-1501A.....	76
<b>Tabla 3-28.</b> Parámetros de la Mantenibilidad de la bomba P-1501B.....	77
<b>Tabla 3-29.</b> Parámetros de la Mantenibilidad de la bomba P-1501C.....	77
<b>Tabla 3-30.</b> Parámetros de la Mantenibilidad de la bomba P-1501D.....	77
<b>Tabla 3-31.</b> Parámetros de la Mantenibilidad de la bomba P-1501E. ....	78
<b>Tabla 3-32.</b> Parámetros de confiabilidad de bomba P-1501A, mediante software RAM (Mora 2007) ....	81
<b>Tabla 3-33.</b> Resultados de mantenibilidad para la bomba P-1501B, nótese que la función sigue la función LogNormal.....	87
<b>Tabla 3-34.</b> Resultados de mantenibilidad para la bomba P-1501C, nótese que la función sigue la función LogNormal.....	89
<b>Tabla 3-35.</b> Resultados de mantenibilidad para la bomba P-1501D, nótese que la función sigue la función LogNormal.....	91
<b>Tabla 0-36.</b> Resultados de mantenibilidad software RAM para la bomba P-1501E, nótese que la función sigue la función Weibull .....	93
<b>Tabla 3-37.</b> Confiabilidad del sistema de reinyección de agua y las confiabilidades de las bombas P-1501 A/B/C/D/E en función del tiempo.....	122
<b>Tabla 4-1.</b> Tabla de resultados de parámetros de confiabilidad de las bombas del sistema de reinyección de agua del ZPF. ....	132
<b>Tabla 4-2.</b> Confiabilidad de las bombas y del sistema de reinyección de agua del ZPF.....	134
<b>Tabla 4-3.</b> Tabla de resultados de parámetros de mantenibilidad de las bombas del sistema de reinyección de agua del ZPF. ....	152

<b>Tabla 4-4.</b> Resultados de la disponibilidad de las bombas de reinyección y el sistema total de reinyección.	160
---	-----

## **INDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A.** Cálculo Hidráulico del sistema de Reinyección del ZPF

**ANEXO B.** Listado de trabajos que implicaron Down Time en bomba P-1501B.

**ANEXO C.** Listado de trabajos que implicaron Down Time en bomba P-1501C.

**ANEXO D** Listado de trabajos que implicaron Down Time en bomba P-1501D.

**ANEXO F.** Listado de trabajos que implicaron Down Time en bomba P-1501E.

**ANEXO G.** Cálculos de la Linealización de la Distribución de la No Confiabilidad de la bomba P-1501A.

**ANEXO H.** Cálculos de la Linealización de la Distribución de la No Confiabilidad de la bomba P-1501B

**ANEXO I.** Cálculos de la Linealización de la Distribución de la No Confiabilidad de la bomba P-1501C

**ANEXO J.** Cálculos de la Linealización de la Distribución de la No Confiabilidad de la bomba P-1501D

**ANEXO K.** Cálculos de la Linealización de la Distribución de la No Confiabilidad de la bomba P-1501E

**ANEXO L.** Cálculos de la Linealización de la Distribución de Mantenibilidad de la bomba P-1501A

**ANEXO M.** Cálculos de la Linealización de la Distribución de Mantenibilidad de la bomba P-1501B

**ANEXO N.** Cálculos de la Linealización de la Distribución de Mantenibilidad de la bomba P-1501C

**ANEXO O.** Cálculos de la Linealización de la Distribución de Mantenibilidad de la bomba P-1501D

**ANEXO P.** Cálculos de la Linealización de la Distribución de Mantenibilidad de la bomba P-1501E

**ANEXO Q.** Fiabilidad en función del tiempo y número de fallas de la bomba P-1501A

**ANEXO R.** Fiabilidad en función del tiempo y número de fallas de la bomba P-1501B

**ANEXO S.** Fiabilidad en función del tiempo y número de fallas de la bomba P-1501C

**ANEXO .** Fiabilidad en función del tiempo y número de fallas de la bomba P-1501D

**ANEXO V.** Fiabilidad en función del tiempo y número de fallas de la bomba P-1501E

## RESUMEN

El sistema de reinyección de agua del bloque 18, Petroamazonas EP, presentaba fallas continuas inesperadas que desencadenaban pérdidas de producción. Al ser la Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad las únicas medidas técnicas y científicas, fundamentadas en cálculos, matemáticos y estadísticos y probabilísticos, se analizó y evaluó integralmente y específicamente las principales bombas del sistema de reinyección de agua obteniendo la situación actual del mismo. Con la estimación de los parámetros de confiabilidad y mantenibilidad se obtuvieron los valores de beta ( $\beta$ ), eta ( $\eta$ ), tiempo medio entre fallas (MTBF) y tiempo medio entre reparaciones (MTTR) de las bombas principales del sistema de reinyección y del sistema como tal, logrando establecer recomendaciones y estrategias que permiten optimizar la planeación, ejecución y control de la gestión y operación del mantenimiento. El modelo universal para el manejo del CMD propuesto por Alberto Mora es la técnica que sigue la investigación. De esta manera se obtuvieron las curvas que rigen a cada bomba en función de sus tiempos de buen funcionamiento y de parada. Finalmente se logra predecir la tendencia de las bombas del sistema permitiendo la comparación de etapa de vida y las recomendaciones para mejorar sus parámetros logrando optimizar recursos y evitar pérdidas de producción.

**Palabras Clave:** <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO>, <REINYECCIÓN DE AGUA>, <ANÁLISIS CMD>, <CURVAS DE CONFIABILIDAD> <CURVAS DE MANTENIBILIDAD>, < TIEMPO MEDIO ENTRE FALLAS>< TIEMPO MEDIO PARA REPARAR>, <MANTENIBILIDAD>, <DISPONIBILIDAD>

## ABSTRACT

The system of water re-injection of block 18, Petroamazonas EP, presents unexpected failures that trigger continuous production losses. To be the Reliability, Maintainability and Availability the only technical and scientific measures, based on mathematical calculations, statistical and probabilistic. It analyzed and evaluated integrally and, specifically the main pumps of the water re-injection system, obtain the current situation of the same. With the estimation of the parameters of reliability, maintainability and availability, ( $\beta$ ), eta ( $\eta$ ), mean time between failure (MTBF) and mean time between repair (MTBR) of the main pumps of the re-injection system and system as such, it established recommendations and strategies that allow you to optimize the planning, execution, control of the management and operation of the maintenance. The universal model RMA proposed by Alberto Mora is the methodology that follows the investigation. In this way the curves were obtained that govern each pump according to their times of good operation and stop. Finally, it is possible to predict the tendency of the system pump, passed in the RMA, making analysis to optimize resources and avoid loss of production, it was concluded that RMA can be applied to the System pumps water re-injection, so it is recommended to continue with the analysis on a constant basis.

**KEYWORDS:** <WATER RE-INJECTION>, <REABILITY>, <REABILITY, MAINTAINABILITY AND AVAILABILITY (RMA)>, <WEIBULL>, <BETA PARAMETER>, <ETA PARAMETER>, <MEAN TIME BETWEEN FAILURES>, <MEAN TIME TO REPAIR>.



## **CAPÍTULO I**

### **1. EL PROBLEMA**

#### **1.1 Introducción**

La presente investigación para elaboración del Análisis de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad del Sistema de Reinyección de Agua de la Empresa Petroamazonas EP, Bloque 18, contribuye a presentar y examinar los indicadores de mantenimiento que poseen las bombas de reinyección de agua del sistema de estudio.

La investigación surge ante la necesidad de acciones que amenoren las pérdidas de producción suscitadas en base a los fallos que mantiene el sistema de reinyección de agua de Petroamazonas EP, Bloque 18. Si bien se han tomado acciones ante la problemática, hace falta un análisis de evaluación integral del proyecto de la gestión del mantenimiento del sistema de reinyección de agua, la presente investigación pretende ser ese medio que permita planear, ejecutar y controlar la gestión y operación del mantenimiento y brindar así propuestas que disminuyan las paradas innecesarias del sistema lo que implica menor cantidad de pérdidas de producción.

La Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad son prácticamente las únicas medidas técnicas y científicas, fundamentadas en cálculos matemáticos, estadísticos y probabilísticos, que tiene el mantenimiento para su análisis y su evaluación integral y específica; es así que el modelo universal de análisis de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad (CMD) propuesto para la presente investigación pretende aportar una metodología única y sintética que permita estimar los diferentes parámetros de una forma lógica, logrando así la comparación similar en el tiempo, ya sea con la propia industria o con otras.

En el capítulo I se hace referencia al diagnóstico de la problemática que mantiene el sistema de reinyección de agua, se proyectan los objetivos a desarrollar y la hipótesis a comprobar. El capítulo II encierra los antecedentes del proyecto investigativo y su marco teórico y conceptual. El capítulo III contiene el diseño de la investigación, estableciendo el tipo de estudio y métodos de la investigación.

En el capítulo IV se indica los resultados de la investigación, los parámetros y curvas encontradas, así como el análisis de las mismas. Finalmente se encuentran las conclusiones y recomendaciones de la investigación en base al método aplicado, así como los anexos de manuales y documentos desglosados de la presente investigación.

## **1.2 Problema de investigación**

### ***2.1.1. Planteamiento del Problema***

PETROAMAZONAS EP, es la empresa pública de exploración y explotación de hidrocarburos en el Ecuador. Dentro de sus activos se encuentra el Bloque 18, Palo Azul.

Durante el proceso de extracción de crudo es inevitable obtener agua de formación y gas. El campo Palo Azul produce a la fecha de investigación 18835 Barriles de petróleo por día (BPPD), junto con 60420 barriles de agua por día (BAPD) y 8481 miles de pies cúbicos de gas por día (MPCSD).

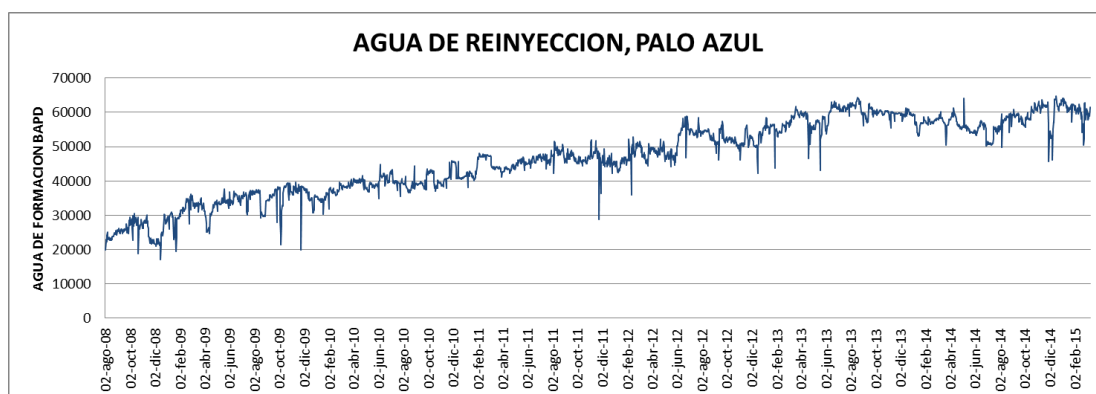
Palo Azul fue diseñado en el año 2006, su capacidad de: exportación de crudo, manejo de gas y agua de formación fue planteada en ese contexto.

Con el pasar del tiempo la cantidad de agua de formación tiene un incremento progresivo en dependencia del yacimiento y condiciones de extracción.

El decreto ejecutivo 1215 del gobierno del Ecuador, indica que el agua de formación debe ser tratada y no puede descargarse a cuerpos de agua sin cumplir ciertos parámetros. El mismo decreto indica que se puede disponer de desechos líquidos por medio de reinyección en una formación porosa tradicionalmente no productora. Para el normal desempeño de las actividades del Bloque 18 y con el creciente aumento de la cantidad de agua a reinyectar, se debe optimizar y asegurar cuan confiable es el sistema de reinyección actual.

Palo Azul en el año 2008 reinyectaba 20.000 BAPD, para el año 2015 el corte de agua de reinyección es 60.000 BAPD, en siete años el corte de agua se triplicó. (Investigación de campo del Autor-PETROAMAZONAS EP)

En el año 2014 una de las bombas principales de reinyección de agua en Palo Azul, sufrió un modo de falla que conllevó a una reparación mayor. La falta de unidad de respaldo, obligó a buscar unidades de reinyección en otros campos de producción. La falta de mano de obra local calificada para reparar la bomba ha provocado que el tiempo de reparación sea sumamente elevado. Finalmente se colocó una bomba similar, mas no igual, este hecho produjo otro contexto operacional, otros modos de falla del sistema, y diferentes parámetros.



**Figura 1-1.** Volumen de agua de reinyección de Palo Azul 2008-2015,

**Fuente:** Autor-PETROAMAZONAS EP.

Actualmente en Palo Azul, tiene problemas de reinyección de agua debido a factores como: no alcanzar el volumen de reinyección que demanda la producción, indisponibilidad de los activos, demoras en reparaciones y de diseño, mismos que se irán detallando en el desarrollo del presente trabajo.

La problemática del sistema de reinyección ha ocasionado incluso paradas de pozos productores debido a la incapacidad de reinyectar el agua de formación precedente de los mismos. Desde Enero de 2015 hasta Junio de 2015, Palo Azul ha acumulado pérdidas totales por 17485.16 barriles de petróleo son 4037.0 horas acumuladas de pérdida.

Es insostenible la cantidad de pérdidas de producción relacionadas a la falta de fiabilidad del sistema de reinyección de agua. Si siguieran las condiciones actuales (incrementando el corte de agua de los pozos productores y con el número de fallas e indisponibilidad de equipos) seguirán incrementándose proporcionalmente las pérdidas de producción. Es necesario contar con más equipos de respaldo entre otras alternativas que aseguren la capacidad de reinyección de agua en Palo Azul, sin dejar a un lado los datos de la proyección macro de la empresa PETROAMAZONAS EP en inversión para ir a la par de un análisis económico.

Tanto el departamento de mantenimiento como de operaciones del campo Palo Azul investigan, aportan, deducen nuevas ideas que ayuden a precautelar el funcionamiento continuo y correcto del sistema. En concordancia, éste proyecto busca generar alternativas de mejora al sistema de reinyección y garantizar el funcionamiento continuo del sistema de reinyección a través de una buena gestión de mantenimiento aplicando métodos y técnicas holísticas de Ingeniería de Confiabilidad.

La Ingeniería de Confiabilidad define métodos y técnicas de optimización del uso de los activos físicos, a través de metodologías como: análisis causa raíz, inspección basada en riesgo, análisis de ciclo de vida, análisis de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad (CMD) entre otras.

El análisis CMD brindará información necesaria para determinar el tiempo probable durante el cual el sistema esté en capacidad de cumplir su función (Disponibilidad), la probabilidad de que el sistema sea reparado a condiciones normales de operación dentro de un tiempo dado (Mantenibilidad) y la probabilidad de que el sistema desempeñe satisfactoriamente sus funciones por un espacio de tiempo dado y bajo un determinado conjunto de condiciones operativas (Confiabilidad).

El pronóstico del sistema de reinyección de agua en el Bloque 18, no es alentador, si continuaran las condiciones del sistema las pérdidas de producción opacarían su desempeño.

### **1.3 Formulación del problema.**

¿El análisis CMD permite realizar una evaluación integral del proyecto de la gestión del mantenimiento del sistema de reinyección de agua?

### **1.4 Sistematización del problema.**

¿De qué manera el análisis de la Confiabilidad del sistema de reinyección de agua permite determinar los índices de Confiabilidad en base a los tiempos de operación o buen funcionamiento?

¿Cómo el análisis de Mantenibilidad del sistema de reinyección de agua permite determinar los índices de Mantenibilidad en base a los tiempos de reparación?

¿Cómo el análisis de Disponibilidad del sistema de reinyección de agua permite determinar la Disponibilidad del sistema en base a los tiempos medios de buen funcionamiento y reparación?

## **1.5 Objetivos de la investigación**

### **2.1.2. *Objetivo general***

Analizar la Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad del sistema reinyección de agua de la empresa PETROAMAZONAS EP, Bloque 18 ZPF, mediante análisis CMD.

### **2.1.3. *Objetivos específicos***

Determinar los índices de Confiabilidad del sistema de reinyección de agua de la empresa PETROAMAZONAS EP, Bloque 18 ZPF, en base a los tiempos de operación o buen funcionamiento.

Constituir los índices de Mantenibilidad del sistema de reinyección de agua de la empresa PETROAMAZONAS EP, Bloque 18 ZPF, en base a los tiempos de reparación.

Definir la Disponibilidad del sistema de reinyección de agua de la empresa PETROAMAZONAS EP, Bloque 18 ZPF, en base a los tiempos medios de buen funcionamiento y de reparación.

Proponer la implementación de mejoras del sistema de reinyección de agua de formación de la empresa PETROAMAZONAS EP, Bloque 18 ZPF, mediante análisis CMD.

## **1.6 Justificación de la investigación**

El campo Palo Azul es uno de los activos de la empresa pública de exploración y explotación hidrocarburífica Petroamazonas EP, su producción actual se mantiene en un promedio de 15,000 Barriles de petróleo por día, acompañada de 60,000 Barriles de agua por día.

El corte de agua de formación, producto de la extracción de crudo, se ha incrementado en función del tiempo de explotación del pozo productor. Los pozos productores de Palo Azul cuentan con tecnología de bombeo electro-sumergible.

Desde la construcción de Palo Azul año 2006, no se ha mejorado la capacidad de reinyección de agua. La operación del sistema de reinyección ha evidenciado: errores de diseño, errores humanos de operación, modos de falla en sistema de sellado, además de las características físico-químicas propias del agua de reinyección de Palo Azul que han ocasionado desgaste prematuro, corrosión, taponamiento, etc.

Actualmente Palo Azul, tiene problemas de reinyección de agua debido a factores como: no alcanzar el volumen de reinyección que demanda la producción, indisponibilidad de los activos, demoras en reparaciones y de diseño.

La problemática del sistema de reinyección ha ocasionado incluso paradas de pozos productores debido a la incapacidad de reinyectar el agua de formación precedente de los mismos. Desde Enero de 2015 hasta Junio de 2015, Palo Azul ha acumulado pérdidas totales por 17,485 barriles de petróleo son 4037.0 horas acumuladas de pérdida. Para la economía de la empresa y del Ecuador es necesario asegurar la producción de petróleo a su más mínimo detalle; por esta razón es importante mantener operativo el campo.

Según la empresa Chilworth, en su artículo: Análisis CMD (Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad) el afán de la investigación planteada es aplicar la metodología CMD al sistema de reinyección para disminuir la probabilidad de pérdida de producción, identificando áreas en las que se pueden aplicar cambios a equipos, procedimientos, operaciones, etc.

Es insostenible la cantidad de pérdidas de producción relacionadas a la falta de fiabilidad del sistema de reinyección de agua. Si siguieran las condiciones actuales (incrementando el corte de agua de los pozos productores y con el número de fallas e indisponibilidad de equipos) seguirán incrementándose proporcionalmente las pérdidas de producción.

En la investigación planteada se espera beneficios tangibles al sistema de reinyección, entre otros: predecir la ocurrencia de eventos no deseados, e identificar acciones concretas para minimizar su ocurrencia así como predecir los escenarios de producción factibles, modelando las incertidumbres asociadas a las variables técnicas y a los procesos de deterioro que rigen su proceso particular de producción.

## **1.7 Hipótesis**

El análisis de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad del sistema de reinyección de agua de Palo Azul, permite evaluar la gestión del mantenimiento y brinda propuestas que disminuyen las paradas innecesarias del sistema lo que se refleja en menor cantidad de pérdidas de producción

## **CAPÍTULO II**

### **2. MARCO DE REFERENCIA**

#### **2.1 Antecedentes Investigativos**

Caña Puche, A. (2006). Este trabajo tiene como propósito principal analizar la Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad de la planta de inyección de agua Resor (Red secundaria Oriente) con la finalidad de incrementar la capacidad de inyección de la planta. La investigación utilizó métodos como el Teorema de Bayes, método de los momentos, y el análisis CMD. Los resultados obtenidos fueron: que la Disponibilidad de la planta oscila entre el 75 y 91%, mientras que el tiempo promedio para reparar es bueno, ya que la puesta en marcha de los equipos es inmediata. La Confiabilidad de la planta se la dictaminó como nula, por las fallas continuas encontradas.

El autor obtuvo los tiempos de operación hasta la falla y los tiempos de reparación de los elementos del sistema y con ellos simuló mediante Raptor 6.0 el comportamiento futuro de los equipos en cuanto a la Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad, con base a esta simulación, sugirió la instalación de un tren adicional de inyección, para de esta manera mejorar la Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad. También se indica en la investigación citada que: El número esperado de fallas con el contexto operacional vigente es de 38, mientras que con un tren adicional este número disminuye hasta un promedio de 4. De igual forma se recomienda: Automatizar el sistema de retro-lavado de los filtros primarios de planta Resor, a fin de evitar el taponamiento de los filtros ubicados en la succión de las bombas booster.

Uparela Saad, J. M. (2013) analizó el comportamiento de un sistema de generación de vapor en una planta química, utilizando las teorías de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad, con el objetivo de plantear estrategias y acciones futuras de mantenimiento para cada uno de los componentes de este sistema. Utilizó distribuciones estadísticas conocidas y analizó el resultado, de esta manera dedujo modelos de predicción de valores y funciones que puedan ser aplicadas en el modelo de estudio. El autor indica que la planta tuvo pérdidas anuales de 50,000 USD anuales como antecedente a la investigación, así mismo identificó un aumento de las fallas



en el sistema de vapor en los dos últimos años, pasando de 5 fallas a 16 fallas anuales. La Confiabilidad que dedujo para el sistema fue de 99.6%., así mismo utilizó el software Forecast Pro XE, para el pronóstico de los elementos del sistema de vapor en bases a los tiempos de funcionamiento que el autor investigó y en base a estas curvas CMD recomendó acciones y estrategias de mantenimiento para cada uno de los elementos del sistema de vapor

Vergara Rea, E. (2007) realizó un trabajo donde utilizó la técnica de análisis CMD sobre el sistema de transporte, almacenamiento y medición de crudo diluido de la empresa Petrozuata. El análisis mostro que la Disponibilidad del sistema de crudo diluido (96.63%) está por debajo de lo establecido o requerido. También demostró que el incremento en la capacidad del sistema de bombeo en un 15% puede ser asumida por el contexto operacional actual.

Adicional se recomendó utilizar una bomba booster, que estaba siendo utilizada para un proceso anexo al de su función primaria se utilice sólo para su actividad primaria.

Yanchapaxi Novillo, E. (2011). Proyecto presentado para realizar estudio actual del sistema inyección de agua de formación del campo Edén en la empresa Petroamazonas EP, así como las soluciones de optimización. Proyecto que nació por el incremento paulatino de producción de agua de formación. La solución propuesta está conformada por el plan de mantenimiento de los equipos así como el seccionamiento del cabezal de descarga de las bombas centrífugas principales en tres partes. La solución fue simulada mediante software Pipe Flow Expert. Así mismo analizó la factibilidad económica de implementación se espera que en cuatro años el proyecto devuelva la inversión.

Un análisis CMD debe ser establecido como parte de un programa de ingeniería de sistemas en proyectos. El establecer un programa CMD puede ayudar a asegurar que un proyecto minimice de problemas relacionados a Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad que pudieran evitar el logro de las metas en seguridad, salud, medio ambiente, desempeño, planificación y económicos. Aplicando un programa CMD a todas las fases de un proyecto puede ayudar a que exista una cohesión costo efectiva entre los programas CMD, es decir, los programas CMD deben estar direccionados para asegurar que las metas del proyecto sean alcanzadas junto con la información necesaria relacionada al CMD, para tomar las decisiones del proyecto, sean provistas oportunamente (Tomado de Guthrie, 1990 por Vergara Rea, E. J. 2007)

Gómez de la Vega H., Medina N., Semeco K, Yanez M., en su trabajo sobre el Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad de Sistema de Producción, describen un estudio proactivo de diagnóstico de la Disponibilidad y el factor de servicio de un proceso de producción para un período determinado de tiempo, en busca de caracterizar el estado actual de un proceso, sistema o equipos para predecir su comportamiento futuro basado en la configuración y Confiabilidad de sus componentes y en la filosofía de mantenimiento, mediante el análisis del historial de fallas y reparaciones, los datos de las condiciones operacionales y datos técnicos. Su finalidad es revelar problemas, definir y desarrollar alternativas de soluciones, reasignar recursos y presupuestos para mejorar efectivamente la productividad del proceso o sistema, a través de la sistemática reducción de la ocurrencia de fallas y eventos no deseados y minimizar su impacto en el negocio medular. Durante las diferentes fases de un proyecto (ingeniería básica, construcción, puesta en marcha y operación) este tipo de estudio proporciona reportes a la medida, que permiten planear, organizar, controlar y comunicar situaciones presentes en los diferentes escenarios analizados permitiendo predecir su productividad, mejoras, trabajos adicionales y actividades críticas.

## **2.2. Marco Teórico**

### **2.2.1. Introducción**

La Confiabilidad, la Mantenibilidad y la Disponibilidad son prácticamente las únicas medidas técnicas y científicas, fundamentadas en cálculos matemáticos, estadísticos y probabilísticos, que tiene el mantenimiento para su análisis y su evaluación científica es a través del CMD que se puede planear, ejecutar y controlar totalmente la gestión y operación del mantenimiento. (Mora 2007).

La confiabilidad ha pasado a ser una herramienta fundamental en los procesos de mantenimiento; ésta permite analizar y evaluar las fallas que ocurren en un período de tiempo.

La Mantenibilidad tiene una connotación estadística relacionada con la probabilidad de que un equipo o sistema pueda volver a su estado normal de operación después de ser intervenido. (Mora, 2011)

La disponibilidad se mide a partir de la confiabilidad y la mantenibilidad, es la probabilidad de que un equipo o sistema funcione correctamente.

La confiabilidad se mide a partir del número y duración de las fallas, la mantenibilidad se cuantifica a partir de la cantidad y de la duración de las reparaciones; mientras que la disponibilidad se mide a partir de la confiabilidad y mantenibilidad (Mora 2007).

### **2.2.2. *Interacción CMD***

La forma en que se realiza la estimación de la Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad es amplia y diversa. Existe mucha literatura anterior y actual que trata sobre los métodos y formas de cálculo, muchas de ellas de principios comunes y otras de metodología disímil.

En la bibliografía de Mantenimiento Estratégico Empresarial, Enfoque Sistemático Kantiano de Alberto Mora Gutierrez se propone un método universal de cálculo CMD. Es esta sistemática, la base primordial del método presente en la investigación propuesta.

El método parte de la premisa que los valores pueden ser pronosticados al inicio en cuanto a los tiempos de falla, tiempos útiles, períodos de mantenimiento planeados, tasa de falla o de reparaciones, etc. o al final del proceso mediante el pronóstico de los parámetros CMD asociados calculados como el Beta, Eta, MTBF, MTTR. Es importante resaltar que el método universal de Mora inicialmente asume la distribución de Weibull que permite cualquier Beta, para luego acorde a este valor del parámetro obtenido realizar la validación de los cálculos y posterior comparación con otras distribuciones en concordancia con el valor de Beta calculado.

### **2.2.3. *Disponibilidad***

Según el Estándar ISO/DIS 14224 – 2004 la definición de Disponibilidad: Es la capacidad de un activo o componente para estar en un estado (arriba) para realizar una función requerida bajo

condiciones dadas en un instante dado de tiempo o durante un determinado intervalo de tiempo, asumiendo que los recursos externos necesarios se han proporcionado.

La disponibilidad es una consideración importante en sistemas complejos donde una alta confiabilidad no es suficiente por sí misma, para asegurar que el sistema esté disponible cuando se requiera. Es también útil para tomar decisiones de adquisición de equipos nuevos.

$$Disponibilidad = \frac{Confiabilidad}{Confiabilidad + Mantenibilidad} \quad (\text{Mora 2007})$$

La probabilidad de que el equipo funcione satisfactoriamente en el momento en que sea requerido después del comienzo de su operación, cuando se usa bajo condiciones estables, donde el tiempo total considerado incluye el tiempo de operación, tiempo activo de reparación, tiempo inactivo, tiempo en mantenimiento preventivo (en algunos casos), tiempo administrativo, tiempo de funcionamiento sin producir y tiempo logístico se define como disponibilidad. (Mora y otros 2007).

La ecuación de la disponibilidad inherente puede ser presentada de la siguiente forma:

$$A_t = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (\text{Mora 2007})$$

#### **2.2.4. Confiabilidad y Mantenibilidad-CMD-Estimación de $F(t)$ y $M(t)$**

La Confiabilidad es la frecuencia con la cual ocurren las fallas en el tiempo. A menor fallas equipo más confiable. La confiabilidad está correspondida con la calidad del producto.

La Confiabilidad de que un equipo desempeñe satisfactoriamente las funciones para las cuales es diseñado, durante un período de tiempo específico y bajo las condiciones de operación, ambientales y de entornos adecuados se define como Confiabilidad. (Mora 2007)

Mora 2007, manifiesta que existen cuatro características que definen la estructura de la confiabilidad: probabilidad, desempeño satisfactorio, período y condiciones de operación.

Probabilidad.- Posibilidad de ocurrencia de un evento en función del número de veces que ha ocurrido para un equipo o familia de equipo en un periodo específico. La representación gráfica de la probabilidad condicional de falla contra la vida útil de los equipos da origen a diferentes modelos de fallas que serán representativos para una gran variedad de equipos eléctricos y mecánicos.

Las mediciones de CM hacen referencia siempre a probabilidad, se definen como el resultado de dividir el número de veces de los casos estudiados entre el número total posible de casos. (Mora 2007)

Desempeño satisfactorio.- Es una característica que permite establecer criterios para describir lo que es un funcionamiento u operación satisfactoria. Una combinación de factores cualitativos y cuantitativos definen las funciones que el equipo debe lograr. (Mora 2007) Permite saber cuándo un equipo o sistema no se encuentra en modo de falla.

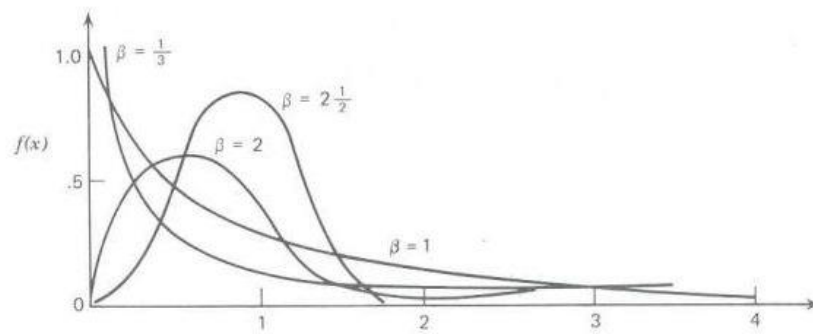
Periodo.- Es la variable aleatoria de la confiabilidad, se refiere a la duración del funcionamiento en condiciones satisfactorias o la duración de vida del elemento; puede estar dado en horas, días, meses, años o por número de ciclos, kilómetros, revoluciones, pulsaciones, etc.

El análisis de dicha variable aleatoria implica el uso de las distribuciones de probabilidad que deben ser modelos razonables de la dispersión de los tiempos de vida (Mora, 2007)

Condiciones operación.- Son las condiciones en las que se espera que el equipo funcione. (Mora 2007)

#### *2.2.4.1. Curva de Confiabilidad*

La curva de confiabilidad es la representación gráfica del funcionamiento después de transcurrido un tiempo  $t$  en un período  $T$  total. Se puede entender como la probabilidad de supervivencia que tiene un elemento después de transcurrido un cierto período de tiempo.



**Figura 2-1.** Curva de Confiabilidad para la distribución de Weibull con diferentes betas.

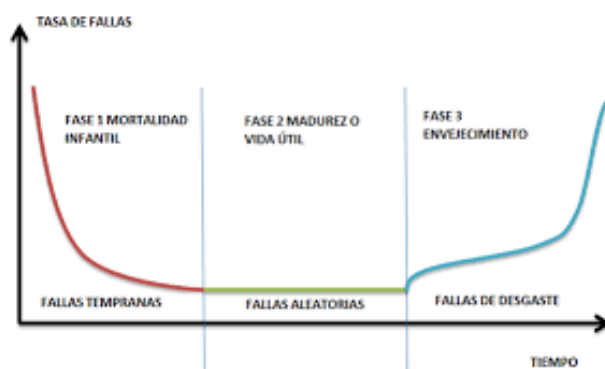
**Fuente:** <http://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/distribucion-weibull/>

### 2.2.5. *Mantenibilidad*

Mantenibilidad es definida por la ISO/DIS 14224, como la capacidad (o probabilidad si se habla en términos estadísticos), bajo condiciones dadas, que tiene un activo o componente de ser mantenido o restaurado en un periodo de tiempo dado a un estado donde sea capaz de realizar su función original nuevamente, cuando el mantenimiento ha sido realizado bajo condiciones prescritas, con procedimientos y medios adecuados. Esto quiere decir, que si un componente tiene un 95% de Mantenibilidad en una hora, entonces habrá 95% de probabilidad de que ese componente sea reparado exitosamente en una hora. (Jimenez 2011)

#### 2.2.5.1. *Curva de la Bañera*

Las diferentes acciones que decidan sobre las tareas a realiza por parte de mantenimiento y producción, dependen entre otros parámetros, de la curva de la Bañera o Davies donde se muestra la tendencia en el tiempo frente a la tasa de fallas y el valor del parámetro de forma Beta del equipo que se evalúa. (Mora 2007)



**Figura 2-2.** Curva de la bañera o de Davies.

**Fuente:** Amaña, J. (2014).

En la curva de la bañera o de Davies se observan tres etapas o fases, estas están caracterizadas por el parámetro de forma  $\beta$ .

FASE I	$0 < \beta < 1$
FASE II	$\beta = 1$
FASE III	$\beta > 1$

Fase I de rodaje o mortalidad infantil.- La tasa de fallas es decreciente, en la medida que pasa el tiempo la probabilidad de que ocurra una falla disminuye, las operaciones sugeridas en esta fase son las de tipo correctivo y modificativo. La eliminación de fallas se logra mediante la aplicación de la metodología de FMECA. (Mora 2007)

Fase II de madurez o de vida útil se triplica por fallas de origen técnico, sea humano o de equipos. Las acciones correctivas son las que se adaptan mejor en esta etapa. La probabilidad de falla es constante. (Mora 2007)

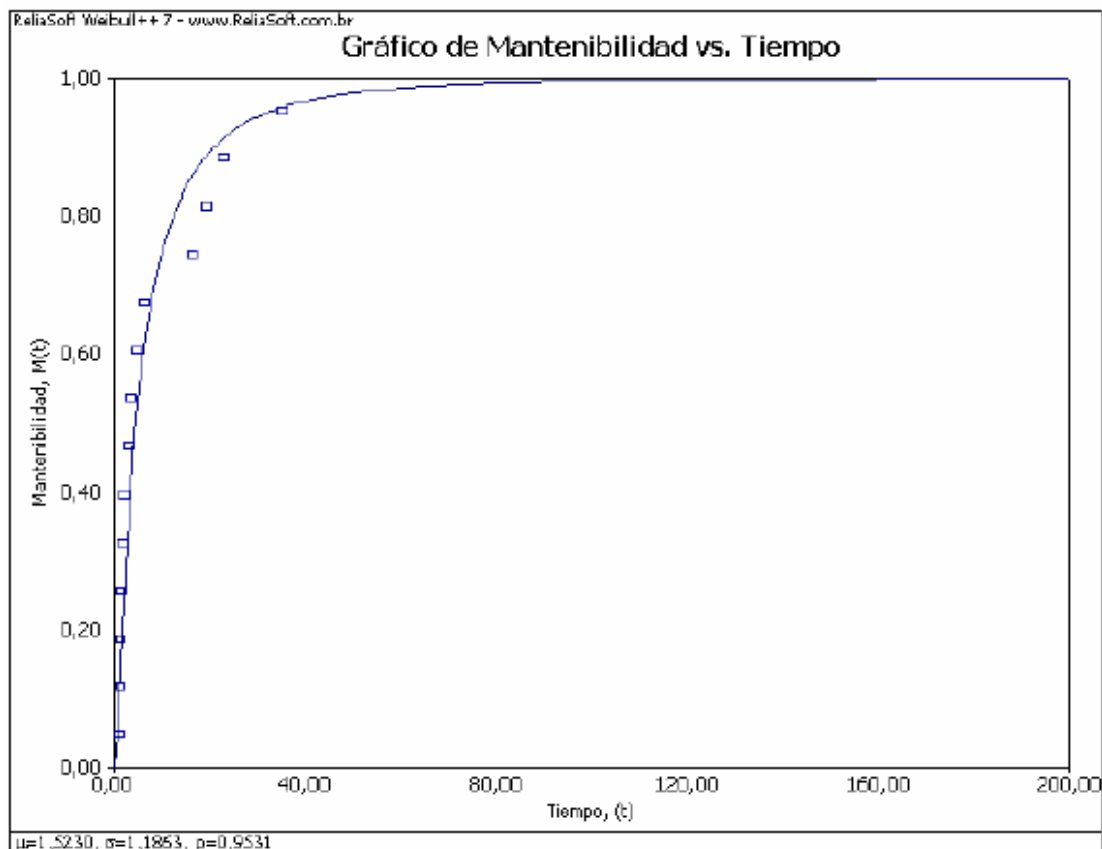
m

Fase III de envejecimiento se observa incremento paulatino de la tasa de fallas en la medida que aumenta el tiempo. Se observan tres etapas. En la etapa I la tasa de fallas aumenta en forma suave, es la zona de ingeniería por excelencia, dominada por mantenimientos preventivos. En la etapa II de la fase III la tasa de fallas incrementa de forma constante, se inicia las acciones

predictivas, finalmente aparece la etapa III que es el envejecimiento puro, donde la vida útil del elemento se acelera y la tasa de fallas incrementa aceleradamente, se estabiliza con acciones predictivas y finalmente la reposición o sustitución (Mora 2007)

#### 2.2.5.2. Curva de Mantenibilidad

Esta función es la representación de la Mantenibilidad en el tiempo  $M(t)$  e indica la probabilidad de que la función del sistema sea recuperada y el equipo sea reparado dentro de un tiempo definido  $t$  antes de un tiempo especificado total  $T$ . Mientras más tiempo pase es más probable que el equipo sea reparado al 100% y en tiempo es cero es imposible reparar cualquier equipo. (Mora 2007)



**Figura 2-3.** Curva de Mantenibilidad  $M(T)$  para distribución de Weibull, Ejemplo Turbina de gas.

**Fuente:** Guevara, F., Kondo, N., Souza, G. y Patiño C. (2007). Recuperado de: <http://congreso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf/06/06-84.pdf>.



Los cálculos de la mantenibilidad se realizan en forma diferente y dependen de la disponibilidad que se use, los elementos que se debe estimar son en cada caso:

- Para la disponibilidad genérica MDT.
- Para disponibilidad inherente MTTR
- Para disponibilidad alcanzada  $\bar{M}$  el cual se obtiene del correctivo con MTTR y de lo planeado con  $M_p$
- Para disponibilidad operacional y operacional generalizada  $\bar{M}$  y  $\bar{M}'$  respectivamente, el cual se obtiene del correctivo con MTR y de lo planeado con  $M_p$ , pero sus valores son diferentes de la  $A_A$  debido a los que se tienen en cuenta los tiempos logísticos de Down Time tanto en el caso de reparaciones como de mantenimientos planeados.

#### **2.2.6. Estimación de No Confiabilidad $F(t)$ y de mantenibilidad $M(t)$**

La estimación de ambos parámetros sigue el Modelo Universal propuesto Mora Gutiérrez Alberto, donde se detalla los pasos del Modelo Universal. La base del Modelo Universal es a partir de la función de Weibull ya que tiene la ventaja de simular la tendencia tanto de la función de No Confiabilidad o de Mantenibilidad; en el caso de que cumpla y se ajuste adecuadamente, si cumple con la prueba de tres bondades de ajuste (Kolmogorv-Smirnov, Anderson-Darling y Chi cuadrado), solo se utiliza una función, caso contrario se utiliza una segunda opción de función, la cual depende del valor de  $\beta$  encontrado en la primera función ( Si esta entre 1,05 y 1,95 utilice Gamma o Log-Normal, si está entre 1,95 y 2,05 solo Weibull, si se encuentra por encima de 2,05 se usa la Normal) . Aparte de Weibull existen muchas funciones de distribuciones, de las cuales algunas se acoplan de mejor manera a la Confiabilidad y Mantenibilidad, entre las más importantes están: Normal, Exponencial, Weibull, Gamma, Log Normal, Binomial, Poisson, Rayleigh. (Mora 2007)

Es importante resaltar la importancia de tener gran cantidad de datos de fallas, tiempos útiles, reparaciones, etc. siquiera al menos en una cifra total evaluada de tiempo mayor a 10 veces el MTTR. (Mora 2007)

### 2.2.7. Métodos de estimación de la No Confiabilidad y de la Mantenibilidad

Es necesario obtener los porcentajes acumulados para cada tiempo de falla  $F(t)$  y para cada ítem de reparación  $M(t)$  para obtener los parámetros de una distribución requerida. Los métodos para realizar la estimación de los parámetros de una distribución, entre otros están: i-kaésimo, rango de medianas por tabla o por aproximación de Bernanrd y el de Kaplan Meier.

Método i-kaésimo o Estimador No sesgado.- Se denomina sesgo de un estimador a la diferencia entre la esperanza (o valor esperado) del estimador y el verdadero valor del parámetro a estimar. Es deseable que un estimador sea insesgado o centrado, es decir, que su sesgo sea nulo por ser su esperanza igual al parámetro que se desea estimar. (Estimador, (s.f.). En Wikipedia. Recuperado el 01 de Junio del 2016 de <https://es.wikipedia.org/wiki/Estimador>)

$$F(t_i) = 1 - R(t_i) = \frac{j}{N+1} \quad (\text{Mora 2007})$$

Método de rango de Medianas.- Para poder trazar la recta de regresión, se debe calcular un estimador para la función de distribución acumulativa  $F(x)$ . Este estimador, llamado Rango de mediana, es un estimador no paramétrico basado en el orden de las fallas. Este aspecto implica que la muestra de datos se debe organizar de menor a mayor (en forma ascendente). (Cálculo de los Parámetros de la Distribución de Weibull, (s.f.). En Realibilityweb. Recuperado el 01 de Junio del 2016 de <http://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/calculo-de-los-parametros-de-la-distribucion-de-weibull/>)

El método se usa para obtener un estimado de la no confiabilidad para cada fallo o en mantenibilidad para cada reparación. Éste es el valor que la probabilidad real de falla debe tener para la enésima falla, para una muestra de  $N$  datos con un nivel de confianza del 50%. (Mora 2007).

$$P = \sum_{j=1}^N \binom{N}{j} Z^j (1 - Z)^{N-j} \quad (\text{Mora 2007})$$

Método de Bernard.-

$$R - M = \frac{j-0.3}{N+0.4} \quad (\text{Mora 2007})$$

Método Kaplan-Meier.- Es el método alternativo al estimado de rango de medianas, para calcular el valor de la no confiabilidad que también utiliza el número de datos de la muestra. (Mora 2007)

$$R - M = 1 - \prod_{j=1}^N \frac{N-j}{N-j+1} \quad (\text{Mora 2007})$$

Mora (2007), no recomienda el método Kaplan-Meier porque la media no alcanza el 50%, esto implica una variación de parámetros en comparación con los otros estimadores.

#### **2.2.8. Parámetros y Distribuciones –CMD-**

En el análisis de datos de vida se deben estimar los parámetros de un modelo de distribución que permiten desarrollar estrategias y acciones de mantenimiento. Estos parámetros se determina una vez seleccionado el modelo de distribución a través de métodos como el método gráfico, mínimos cuadrados y máxima verosimilitud.

#### **2.2.9. Estimación de parámetros**

En el análisis de los datos de vida y en la ingeniería de confiabilidad se deben estimar los valores de la probabilidad de falla, la probabilidad de éxito o confiabilidad, la vida media, los parámetros de una distribución o cualquier otro parámetro aplicable, que son los instrumentos que permiten desarrollar estrategias y acciones claras de mantenimiento e ingeniería de fábricas. (Mora 2007)

La estimación de los parámetros de distribución se realiza una vez seleccionado el modelo de distribución para describir los datos; existen dos tipos: estimación puntual, donde se busca el mejor cálculo del parámetro a partir de los datos disponibles; y la estimación de intervalo, donde se mide los límites inferior y superior del parámetro desconocido.

Los métodos más comunes para estimar los parámetros de una distribución son: el método gráfico, el método de mínimos cuadrados y el método de máxima verosimilitud MLE. (Mora 2007).

### **2.2.10. Distribución de Weibull**

#### **2.2.10.1. Fundamentos**

La distribución de Weibull es una distribución versátil que se puede utilizar para modelar una amplia gama de aplicaciones en ingeniería, investigación médica, control de calidad, finanzas y climatología. Por ejemplo, la distribución se utiliza frecuentemente en análisis de fiabilidad para modelar datos de tiempo para falla, como la probabilidad de que una parte falle después de uno, dos o más años. La distribución de Weibull también se utiliza para modelar datos asimétricos del proceso en el análisis de capacidad. (Distribución De Weibull – Minitab®, 2016).

Una de las ventajas de la distribución de Weibull es que es muy manejable y se acomoda a las tres zonas de la curva de la bañera. Es la distribución más usada, utiliza tres zonas (infancia, vida útil y envejecimiento) de la curva de Davies. La distribución posee tres parámetros más utilizados (Mora 2007):

- Eta.- Parámetro de escala o característica de la vida útil ( $\eta$ ); es el valor determinante de la vida útil. La escala, o vida característica, es el percentil 63.2 de los datos. La escala define la posición de la curva de Weibull respecto del valor de umbral, lo cual es análogo a la forma en que la media define la posición de una curva normal. Una escala de 20, por ejemplo, indica que 63.2% de los equipos fallarán en las primeras 20 horas después del valor umbral de tiempo.
- Beta.- parámetro de forma Beta ( $\beta$ ), refleja la dispersión de los datos y determina la forma que toma la distribución. Describe cómo están distribuidos los datos. Una forma de 3 se aproxima a una curva normal. Una forma entre 2 y 4 aún es aproximadamente normal. Un valor de forma menor, por ejemplo 1.25, produce una curva con asimetría hacia la derecha. Un valor de forma alto, por ejemplo 10, produce una curva con asimetría hacia la izquierda.
- Gamma.- parámetro de posición. Indica el lapso en el cual la probabilidad de falla es nula. Generalmente se asume que es cero.

La distribución modela la distribución de fallos (en sistemas) cuando la tasa de fallos es proporcional a una potencia del tiempo:

- Un valor  $k < 1$  indica que la tasa de fallos decrece con el tiempo.
- Cuando  $k = 1$ , la tasa de fallos es constante en el tiempo.
- Un valor  $k > 1$  indica que la tasa de fallos crece con el tiempo.

### Curvas características de Weibull

**Función acumulativa de fallas:**

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) * d(t)\right] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right]$$

**Función de densidad de probabilidad de falla:**

$$f(t) = \lambda(t) * R(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^{\beta-1} * \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right]$$

2.2.10.2. *Método gráfico de papel de Weibull o Allen-Plait para determinación de los parámetros  $\beta$  y  $\eta$*

El procedimiento consiste en graficar los valores  $F(t)$  o de  $M(t)$  en el eje Y, con sus respectivos tiempos en el eje X. la forma que posee el papel Weibull permite confirmar una línea recta, a partir de la cual se obtiene el valor tanto de la pendiente ( $\beta$ ) como la intersección de la misma con el eje Y vertical;

Beta es el valor que se puede leer de la intersección de la recta paralela a la obtenida del trazo de  $t$  y  $F(t)$  con una escala tabulada del 0 al 7;  $\eta$  es el valor de la intersección de la recta trazada con la línea paralela al eje de las abscisas correspondientes al 63.2% de fallas acumuladas.

### Ecuación aplicable:

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp[-\int \lambda(t) * d(t)] = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (\text{Mora 2007})$$

#### 2.2.10.3. Método de mínimos cuadrados para para determinación de los parámetros $\beta$ y $\eta$ en Weibull

Mínimos cuadrados es una técnica de análisis numérico enmarcada dentro de la optimización matemática, en la que, dados un conjunto de pares ordenados variable independiente, variable dependiente y una familia de funciones, se intenta encontrar la función continua, dentro de dicha familia, que mejor se aproxime a los datos (un "mejor ajuste"), de acuerdo con el criterio de mínimo error cuadrático. (Mínimos cuadrados, Wikipedia@2016)

Existen numerosas leyes físicas en las que se sabe de antemano que dos magnitudes  $x$  e  $y$  se relacionan a través de una ecuación lineal

$$y = ax + b$$

Donde las constantes  $b$  (ordenada en el origen) y  $a$  (pendiente) dependen del tipo de sistema que se estudia y, a menudo, son los parámetros que se pretende encontrar. El método más efectivo para determinar los parámetros  $a$  y  $b$  se conoce como técnica de mínimos cuadrados.

Consiste en someter el sistema a diferentes condiciones, fijando para ello distintos valores de la variable independiente  $x$ , y anotando en cada caso el correspondiente valor medido para la variable dependiente  $y$ . De este modo se dispone de una serie de puntos  $(x_1, y_1)$ , ...,  $(x_n, y_n)$  que, representados gráficamente, deberían caer sobre una línea recta. Sin embargo, los errores experimentales siempre presentes hacen que no se hallen perfectamente alineados. El método de mínimos cuadrados determina los valores de los parámetros  $a$  y  $b$  de la recta que mejor se ajusta a los datos experimentales.

$$\sum_{j=1}^N (\hat{a} + \hat{b} \cdot x_i - y_i)^2 = \min(a, b) \sum_{j=1}^N (a + b \cdot x_i - y_i)^2 \quad (\text{Mora 2007})$$

### *Criterios de calidad de la alineación*

Existen muchos criterios para “evaluar” la calidad de la alineación lograda. Entre los principales están: ajuste, error estándar del estimado, coeficiente de muestra de determinación  $r^2$  y coeficiente de correlación  $r$ .

Mora 2007, indica que existen criterios de la calidad de la alineación realizada, entre otros habla sobre dos principales: Coeficiente de determinación muestral “ $R^2$ ” y coeficiente de correlación “ $R$ ”. El primero evalúa la fuerza o grado de asociación que existe entre los puntos correspondientes de las dos variables Y y X, debe acercarse a 1 y se permite un valor de 0.9025. El segundo evalúa lo bien que el modelo se ajusta en la regresión lineal, e indica la correlación existente entre los dos datos y el estimador de no confiabilidad o de mantenibilidad, se considera cuando está entre 0.95 y 1.

### *Ecuaciones aplicadas para la confiabilidad y Mantenibilidad de Weibull:*

Para la distribución de Weibull los valores de Y y X para el caso de la No Confiabilidad  $F(t_j)$ :

$$Y_j = \ln \left[ \ln \left[ \frac{1}{1 - F(t_j)} \right] \right]$$
$$X_j = \ln(t_j)$$
$$MTBF = \eta * \text{Función Gamma} \left( 1 + \frac{1}{1 + \text{Beta}} \right)$$

Para la distribución de Weibull los valores de Y y X para el caso de la Mantenibilidad  $M(t_j)$ :

$$Y_j = \ln \left[ \ln \left[ \frac{1}{1 - M(t_j)} \right] \right]$$
$$X_j = \ln(t_j)$$
$$MTTR = \eta * \text{Función Gamma} \left( 1 + \frac{1}{1 + \text{Beta}} \right)$$

### **2.2.11. Distribución Normal**

#### **2.2.11.1. Fundamentos**

La Normal es la distribución de probabilidad más importante. Multitud de variables aleatorias continuas siguen una distribución normal o aproximadamente normal. Una de sus características más importantes es que casi cualquier distribución de probabilidad, tanto discreta como continua, se puede aproximar por una normal bajo ciertas condiciones.

La distribución de probabilidad normal y la curva normal que la representa, tienen las siguientes características:

- La curva normal tiene forma de campana y un solo pico en el centro de la distribución. De esta manera, la media aritmética, la mediana y la moda de la distribución son iguales y se localizan en el pico. Así, la mitad del área bajo la curva se encuentra a la derecha de este punto central y la otra mitad está a la izquierda de dicho punto.
- La distribución de probabilidad normal es simétrica alrededor de su media.
- La curva normal desciende suavemente en ambas direcciones a partir del valor central. Es asintótica, lo que quiere decir que la curva se acerca cada vez más al eje X pero jamás llega a tocarlo. Es decir, las “colas” de la curva se extienden de manera indefinida en ambas direcciones.

Es una distribución discreta que se representa con frecuencia cuando la vida útil de los componentes se ve afectada desde un comienzo por el desgaste, sirve para describir los fenómenos de envejecimiento. (Mora 2007)

La distribución normal responde a los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$  que representan la media y la desviación estándar de la distribución respectivamente; los cuales se estiman a partir de valores de la pendiente e intercepto con el eje Y obtenidos de la recta alineada de la distribución normal mediante los métodos de estimación de parámetros. (Mora 2007)



### *2.2.11.2 Método gráfico de papel para determinación de los parámetros $\mu$ y $\sigma$ en distribución Normal*

Existen distintos métodos gráficos para la función Normal, la metodología es muy similar a la utilizada en el gráfico de Allen Plait. Este método adopta la función de probabilidades de falla acumuladas  $F(t)$  la cual trata de alinearla en forma recta, y se vale de la construcción de los ejes de las coordenadas Y y X con transformaciones especiales, utilizadas en los papeles de su función.

Los puntos son graficados y a partir de la mejor recta que pueda ser dibujada se obtiene la pendiente y los parámetros necesarios se logran a partir de lecturas específicas en el papel. En general el método brinda poca exactitud. (Mora 2007)

### *2.2.11.3 Método de mínimos cuadrados para para determinación de los parámetros $\mu$ y $\sigma$ con distribución Normal*

Para la distribución Normal valores de Y y X para el caso de la No Confiabilidad  $F(t_j)$ :

$$Y_j = \Phi^{-1}[F(t_j)]$$

$$X_j = (t_j) \quad \text{Donde } \Phi^{-1} \text{ Es el inverso de la distribución normal estándar.}$$

Para la distribución Normal los valores de Y y X para el caso de la Mantenibilidad  $M(t_j)$ :

$$Y_j = \Phi^{-1}[M(t_j)]$$

$$X_j = (t_j)$$

$$\text{Desviación estándar} = \sigma = \frac{1}{b} = \frac{1}{\text{Pendiente de la recta alineada}}$$

$$\text{Media} = \mu = -a * \sigma = -\text{Intercepto} * \text{Desviación estándar.}$$

$$MTBF = -a * \frac{1}{b}$$

$$MTTR = -a * \frac{1}{b}$$

### **2.2.12. Distribución LogNormal**

#### **2.2.12.1. Fundamentos:**

En probabilidades y estadísticas, la distribución normal logarítmica es una distribución de probabilidad de una variable aleatoria cuyo logaritmo está normalmente distribuido. Es decir, si X es una variable aleatoria con una distribución normal, entonces  $\exp(X)$  tiene una distribución log-normal. (Distribución Lognormal, Wikipedia@2016)

La distribución LogNormal se genera a partir de los parámetros  $m$  y  $s$  debido a que el logaritmo de una variable aleatorio LogNormal es una variable aleatoria normal con media  $m$  y desviación estándar  $s$  (Barlow, 1998)

Los valores de  $\mu$  y  $\sigma$  no son la media y la desviación estándar de la variable aleatoria, sino de su logaritmo. Los tiempos de reparación de componentes se ajustan bien a este modelo de distribución (Mora, 2007).

#### **1.7.1.1 Método gráfico de papel para determinación de los parámetros $\mu$ y $\sigma$ con distribución LogNormal**

Existen distintos método gráficos para la función LogNormal, la metodología es muy similar a la utilizada en el gráfico de Allen Plait. Este método adopta la función de probabilidades de falla acumuladas  $F(t)$  la cual tarta de alinearla en forma recta, y se vale de la construcción de los ejes de las coordenadas Y y X con transformaciones especiales, utilizadas en los papeles de su función.

Los puntos son graficados y a partir de la mejor recta que pueda ser dibujada se obtiene la pendiente y los parámetros necesarios se logran a partir de lecturas específicas en el papel. En general el método brinda poca exactitud. (Mora 2007)

#### 1.7.1.1 Método de mínimos cuadrados para para determinación de los parámetros $\mu$ y $\sigma$

Para la distribución Log Normal valores de Y y X para el caso de la No Confiabilidad  $F(t_j)$ :

$$Y_j = \Phi^{-1}[F(t_j)]$$

$$X_j = \ln(t_j) \quad \text{Donde } \Phi^{-1} \text{ Es el inverso de la distribución normal estándar.}$$

Para la distribución de Weibull los valores de Y y X para el caso de la Mantenibilidad  $M(t_j)$ :

$$Y_j = \Phi^{-1}[M(t_j)]$$

$$X_j = \ln(t_j)$$

$$\text{Desviación estándar} = \sigma = \frac{1}{b} = \frac{1}{\text{Pendiente de la recta alineada}}$$

$$\text{Media} = \mu = -a * \sigma = -\text{Intercepto} * \text{Desviación estándar.}$$

$$MTBF = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)}$$

$$MTTR = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)}$$

#### 2.2.13. Pruebas de Bondad de ajuste

La bondad de ajuste de un modelo estadístico describe lo bien que se ajusta un conjunto de observaciones. Las medidas de bondad en general resumen la discrepancia entre los valores observados y los que valores esperados en el modelo de estudio. Tales medidas se pueden emplear en el contraste de hipótesis. (Bondad de Ajuste, (s.f.). En Wikipedia. Recuperado el 01 de Junio del 2016 de [https://es.wikipedia.org/wiki/Bondad\\_de\\_ajuste](https://es.wikipedia.org/wiki/Bondad_de_ajuste))

Las pruebas que se utilizarán para la presente investigación son: Kolmogórov-Smirnov, la de Anderson-Darling, y la prueba  $J^2$  Chi.

#### 2.2.13.1. *Kolmogórov-Smirnov*

La prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S) para una muestra se considera un procedimiento de "bondad de ajuste", es decir, permite medir el grado de concordancia existente entre la distribución de un conjunto de datos y una distribución teórica específica. Su objetivo es señalar si los datos provienen de una población que tiene la distribución teórica especificada.

Mediante la prueba se compara la distribución acumulada de las frecuencias teóricas ( $f_t$ ) con la distribución acumulada de las frecuencias observadas ( $f_{obs}$ ), se encuentra el punto de divergencia máxima y se determina qué probabilidad existe de que una diferencia de esa magnitud se deba al azar.

#### 2.2.13.2. *Anderson Darling*

El estadístico de Anderson-Darling (AD) mide qué tan bien los datos siguen una distribución particular. Por lo general, mientras mejor se ajusta la distribución a los datos, menor será el estadístico AD. Es una modificación de la prueba K-S

El estadístico AD se utiliza para calcular el valor p para la prueba de bondad del ajuste, la cual le permite determinar qué distribución se ajusta mejor a sus datos. Por ejemplo, el estadístico AD se calcula para cada distribución cuando se ejecuta identificación de distribución individual. Los valores p calculados a partir del estadístico le permite determinar qué modelo de distribución puede usar para un análisis de capacidad o un análisis de confiabilidad. El estadístico AD también se utiliza para probar si una muestra de datos proviene de una población con una distribución específica.. (Minitab Statistical Software, ¿Cómo se utiliza el estadístico de Anderson-Darling para evaluar el ajuste de la distribución? 2016. Recuperado de <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/quality-tools/capability-analyses/distributions-and-transformations-for-nonnormal-data/anderson-darling-and-distribution-fit/>)

#### 2.2.13.3. $Ji^2$ – Chi cuadrado

La prueba se utiliza para probar si una muestra de datos proviene de una población con distribución específica. La prueba puede ser aplicada a cualquier distribución univariada, a la cual se pueda estimar su función de distribución acumulada. (Mora 2007)

#### 2.2.14. Estimaciones de sistemas o equipos en serie o paralelo

##### 2.2.14.1. Estructura en Serie

Es aquella donde todos los componentes deben estar funcionando adecuadamente para que funcione el sistema.

Una falla en uno de los componentes implica la no funcionalidad de todo el sistema.

Para calcular la confiabilidad del sistema en serie se multiplica las confiabilidades de cada uno de sus componentes. Esto implica que si disminuye la confiabilidad de uno de sus componentes todo el sistema disminuye. (Mora 2007)

$$R_s = R(x_1) * R(x_2) * R(x_3) \dots R(x_n) \quad (\text{Mora 2007})$$

$$R_s = \prod_{j=1}^N R(x_j) = \prod_{j=1}^N R_j \quad (\text{Mora 2007})$$

##### 2.2.14.2. Estructura en paralelo

Las estructuras en paralelo o redundantes sólo fallan si todos los componentes del sistema fallan. La falla de uno o más componentes redundantes, no son detectadas a menos que haya inspecciones periódicas. Con inspecciones reiteradas de los componentes el MTBF del sistema incrementa. (Mora 2007)

$$R_s = 1 - [F(x_1) * F(x_2) * F(x_3) \dots F(x_n)]$$

$$R_s = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - R(x_j)) = 1 - \prod_{j=1}^N F_j \quad (\text{Mora 2007})$$

### 2.2.15. Simulación Montecarlo

El método de Monte Carlo es un método no determinista o estadístico numérico, usado para aproximar expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud. El método se llamó así en referencia al Casino de Monte Carlo (Principado de Mónaco) por ser “la capital del juego de azar”, al ser la ruleta un generador simple de números aleatorios. (Peña Sánchez de Rivera, Daniel (2001). Deducción de distribuciones: el método de Monte Carlo, en Fundamentos de Estadística. Madrid: Alianza Editorial. ISBN 84-206-8696-4. Recuperado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo\\_de\\_Montecarlo](https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_Montecarlo))

La simulación en el contexto de mantenimiento y confiabilidad se refiere a la “Simulación Monte Carlo” (MCS) la cual utiliza una serie de números aleatorios para representar las probabilidades de falla. Primero se substituyen números aleatorios en  $F(t)$  en la ecuación de edad confiabilidad y resuelve para “t”. Este cálculo se repite para cada uno de los componentes del sistema generando así una distribución de probabilidad de sus fallas. La MCS utiliza una técnica similar para generar los tiempos down del sistema a partir de la generación aleatoria de las probabilidades de reparación de los componentes. (Oscar Hoyos Vásquez. (2011). Living Reliability. Comunidad LRCM. Recuperado de: <http://www.livingreliability.com/wordpress/posts/simulacion-monte-carlo>)

### 2.3.Marco conceptual

**BAPD.-** Barriles de agua por día. Capacidad de reinyección de agua de formación de una estación petrolera.

**MPCS.-** Miles de pies cúbicos estándar de gas.

**BPPD.-** Barriles de petróleo por día.

**Modo de fallo.-** causa fundamental de un fallo.

**Contexto operacional.-** características intrínsecas de un sistema muy particular aplicable a cada realidad,

**Activo.-** según Placencia Urrutia, S. (2015), un activo es algo que tiene valor potencial o real para una organización. El valor puede variar entre diferentes organizaciones y sus partes interesadas y puede ser tangible o intangible, financiero o no financiero.

**Ingeniería de Confiabilidad.-** según Rivera Mejía, J. es la función de la ingeniería la cual provee las herramientas teóricas y prácticas para predecir, diseñar, probar y demostrar la Confiabilidad de partes, componentes y sistemas y asegurar sus requerimientos y optimizar su seguridad, Disponibilidad y niveles de calidad.

**Disponibilidad.-** según Sexto, L.F. (2015) es la probabilidad de que un activo esté en estado de funcionar (ni averiado ni en revisión) en un tiempo dado.

**Mantenibilidad.-** es la probabilidad de que, después del fallo, sea reparado en un tiempo dado siguiendo los procedimientos de la empresa.(Sexto, L.F. 2015)

**Confiabilidad.-** según la norma UNE EN 60300 2:2004, la palabra Confiabilidad es un término colectivo utilizado para describir la Disponibilidad de un producto y los factores que la condicionan, a saber: Fiabilidad, Mantenibilidad y Logística de Mantenimiento.

**Agua Disposal.-** agua de desecho también llamada agua de formación. Sub producto de la extracción de crudo.

**Tasa de fallo.-** número de fallos en unidad de tiempo. (Sexto, L.F. 2015)

**OREDA.-** Proyecto Offshore Reliability Data (OREDA) se estableció en 1981 en cooperación con el Directorio Noruego del Petróleo. El objetivo inicial de OREDA fue la recolección de datos de Confiabilidad para equipos de seguridad. La organización actual se estableció en 1983 como un grupo de cooperación entre varias compañías petroleras, al tiempo que el objetivo de OREDA se extendió para cubrir datos de Confiabilidad de un amplio rango desde equipos utilizados en la exploración y producción de petróleo y gas. Los equipos submarinos y de plataformas costa afuera son cubiertos de una manera preponderante, aunque también se incluyen algunos equipos de E&P costa adentro.

**Falla Funcional.-** estado en el cual un activo físico o sistema no es capaz de ejecutar una función específica a nivel de desempeño deseado.

**Mantenimiento clase mundial.-** son las mejores técnicas, tácticas, que satisfacen y superan las expectativas del mantenimiento.

**Pozo Productor.-** son aquellos que permiten extraer los fluidos de las formaciones productoras, mientras los no Productores (Secos), una vez terminados no producen ni petróleo ni gas en cantidades suficientes como para ser económicamente rentable.

**Vida Útil.-** es la duración estimada que un objeto puede tener, cumpliendo correctamente con la función para el cual ha sido creado. Normalmente se calcula en horas de duración.

**Tiempo de buen funcionamiento.-** también llamado tiempo entre averías, es el tiempo entre dos fallas consecutivas, es decir donde el activo cumple cien por ciento con su función.



**Tiempo promedio entre fallas.-** también conocido por sus siglas en ingles MTBF, El MTBF es el tiempo medio entre cada ocurrencia de una parada específica por fallo (o avería) de un proceso, o en otras palabras, la inversa de la frecuencia con que ocurre cada parada.

**Tiempo promedio de reparación.-** conocido por sus siglas en inglés MTTR, es el tiempo promedio que toma a un activo retornarlo a condiciones de cumplir con su función después de un fallo.

**Avería.-** según la norma EN 13306 es el estado de un elemento caracterizado por la incapacidad para desarrollar una función requerida, excluyendo la incapacidad durante el mantenimiento preventivo o por otras acciones planificadas, o debido a la falta de recursos externos.

**Fallo.-** según la norma EN 13306 es el cese en la capacidad de un elemento para desarrollar una función requerida.

NOTA 1 – Después del fallo el elemento presenta una avería, la cual puede resultar completa o parcial.

NOTA 2 – El “fallo” es un evento, a diferenciar de la “avería” que es un estado.

## CAPÍTULO III

### 3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. Tipo de estudio

A nivel de conocimientos aplicados en la presente investigación, se identifican tres niveles de tipo de estudio alcanzados:

A **nivel exploratorio**, el autor estableció el contacto con el sistema de reinyección de agua y su problemática de paradas continuas, dando esa visión general de tipo aproximado de la falta de confiabilidad de las bombas que forman el sistema de reinyección

Para la investigación planteada se utilizó el **nivel descriptivo**, ya que éste permite identificar los elementos inmersos en el análisis CMD del sistema de reinyección de agua así como las características del contexto operacional con el cual interactúa el sistema de reinyección de agua del B18 de la empresa Petroamazonas EP.

A **nivel correlacional** ya que el presente estudio persigue el grado de relación existente entre las variables de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad de las bombas que forman el sistema de reinyección de agua.

Si bien la investigación alcanza los niveles mencionados en forma general se identifica con un **tipo de estudio explicativo** ya que busca el por qué de los hechos, estableciendo relaciones de causa-efecto. Es menester de la presente investigación obtener el status actual del sistema de reinyección de agua y las relaciones que lo rigen para posterior manipulación de variables con resultados anticipados.

#### 3.2. Método de investigación

Para la elaboración de la presente investigación se utilizará el **método de análisis**, esto debido a que es necesario diagnosticar las características y el comportamiento de cada elemento del sistema de reinyección; seguidamente identificar como se establece relación entre ellos con el afán de entender sus modos de falla y el por qué de sus fracasos tan frecuentes así como las causas predominantes. Una vez obtenida la información predecir qué sucedería en el sistema con ciertas modificaciones es decir simular sus posibles propuestas de mejora.

El tipo de investigación no experimental es del tipo transeccional descriptiva: los diseños de investigación transeccional o transversal recolectan datos en un solo momento, en un tiempo único. Su propósito es describir variables, y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado.

### **3.3. Población**

En el presente estudio la población está constituida por el sistema de reinyección de agua del Bloque 18 con todos sus elementos constitutivos. Para conseguir información sobre la población es necesario utilizar fuentes de información referentes a los equipos; dicha información se la obtuvo dentro de la base de datos Maximo IBM, donde se registran todas las fallas de los equipos, y en la base de datos OREDA. En vista que la población contiene una gran cantidad de equipos, instrumentos de control, de registro y medición de parámetros, es necesario utilizar una muestra. Se discrimina una muestra representativa que define exactamente las características de la población. Se definió el conjunto formado por las bombas multietapas, esto con el afán de personificar el sistema más crítico, ya que del mismo depende la operatividad del sistema. Este sistema está formado por cinco bombas multietapas las bombas P-1501A, P-1501B, P-1501C, P-1501D y P-1501E.

### **3.4. Fuentes y técnicas para recolección de datos**

Las fuentes del presente trabajo son básicamente la observación de campo y las fuentes documentales. La base de datos almacenada en Máximo Oil & Gas, la bitácora de operaciones del cuarto de control de Palo Azul de la empresa PETROAMAZONAS EP, son las fuentes básicas de recolección de datos.

Como fuente primaria se incluye la observación y su instrumento el registro global. El Sistema de gestión de mantenimiento de la empresa Petroamazonas EP es “Maximo IBM”, éste será la principal fuente de información junto con la bitácora escrita de operaciones de Bloque 18 que se encuentra en el cuarto de control. Durante la presente investigación se utiliza los softwares: RAM (Mora, 2007), FIASOFT, ICR v. 12.02.0.5 y SIM 1.7.

### **3.5. Metodología**

La línea de investigación del estudio propuesto corresponde al análisis y modelaje probabilístico de índices de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad. Para la medición CMD se utilizará el modelo universal e integral propuesto por Mora (2009) en su libro Mantenimiento Estratégico Empresarial.

Paso 1: Obtención de los datos de los tiempos útiles, fallas, reparaciones, tiempos perdidos de producción y mantenimiento, tiempos de suministros, demás tiempos requeridos. Se debe resaltar la importancia de la verosimilitud y correlación cronológica. Para el presente trabajo la base de datos Maximo Oil & Gas implantada en el año 2011 en el campo Palo Azul, PETROAMAZONAS EP, es la fuente de donde se obtuvo los tiempos de falla, tiempos de buen funcionamiento.

Paso 2: Trata sobre la preparación de los datos de fallas, reparaciones, tiempos útiles, mantenimientos, otras actividades, etc., dependiendo de la disponibilidad a usar (Genérica o de Steady-state, Inherente o Intrínseca, Alcanzada, Operacional y Operacional Generalizada) y de los requerimientos específicos del cálculo. Se separa lo correctivo de lo planeado. En la presente investigación la disponibilidad inherente es la que se calcula, esto por el hecho de no contar con tiempos exactos de demoras logísticas, suministros, retrasos. (Mora, 2007). Blanchard (1994) define a la disponibilidad inherente como la probabilidad de que el sistema opere satisfactoriamente cuando sea requerido en cualquier tiempo bajo las condiciones de operación especificadas y un entorno ideal de soporte logístico, es decir con la disponibilidad adecuada de personal, repuestos, herramientas, equipos de prueba y demás, sin considerar ninguna demora logística o administración. En los datos obtenidos de Maximo Oil & Gas existe la diferenciación entre tiempos de para del equipo sea por mantenimiento preventivo o por correctivo. Para el

análisis de la disponibilidad inherente solo se utilizará los tiempos por mantenimientos correctivos.

Paso 3: Decidir sobre el uso del Método de máxima verosimilitud o de Estimación de parámetros de No confiabilidad y de Mantenibilidad para obtener los valores más probables de los parámetros para una distribución dada. Para la presente investigación se utiliza el método ikésimo tanto de forma manual como en la hoja de cálculo o software RAM adicional al libro Mantenimiento Estratégico Empresarial de Mora 2007.

Paso 4: Realizar los cálculos de los parámetros de Weibull y validar las pruebas de bondad de ajuste, mediante tres pruebas Kolmogórov-Smirnov, Anderson-Darling y Chi cuadrado Ji2. Realizar la validación de bondad y ajuste para comprobar si los datos que se observan corresponden a la distribución escogida. Con la ayuda de la hoja de cálculo o software RAM adicional al libro Mantenimiento Estratégico Empresarial de Mora 2007, se verifica el cumplimiento de la función escogida. Con la ayuda de Excel y las formulas correspondientes se proceden a estimar los parámetros de  $\beta$ ,  $\eta$  y MTBF; estos parámetros calculados son comprobados con la hoja de cálculo o software RAM, Mora 2007 y también por el software FIASOFT, producto de la tesis “Desarrollo de un software para determinar los índices de fiabilidad en máquinas y equipos industriales” por Cristian Flores y Luis Hidalgo, ESPOCH 2008.

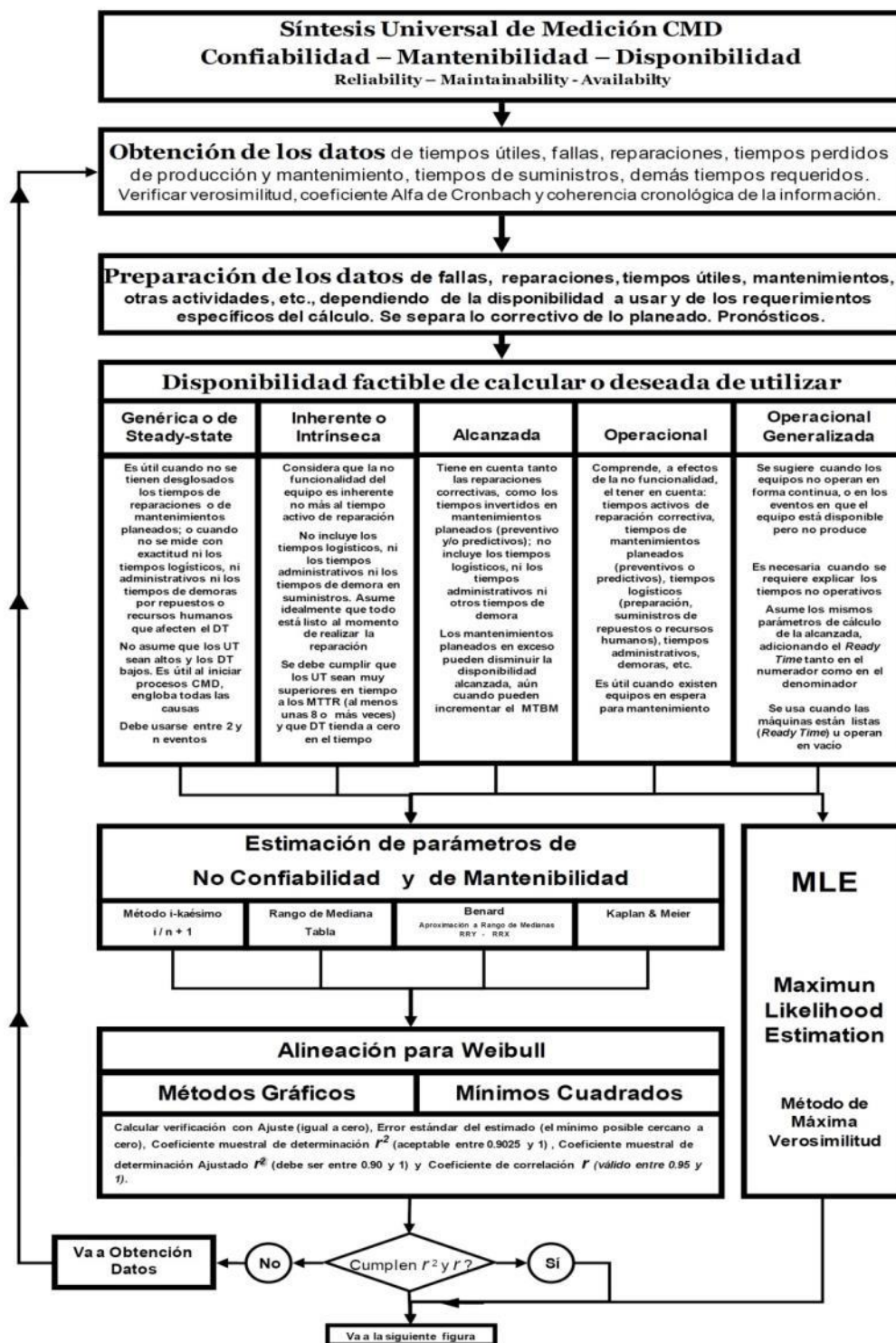
Paso 5: Parametrizar y realizar alineación o método de máxima verisimilitud que se requiere con otra función específica diferente a Weibull para estimar sus bondades de ajuste a partir del dato de Beta ( $\beta$ ) resultado del cálculo en el paso cuatro; definir cuál distribución aplica de acuerdo al parámetro. El objetivo de la alineación es estimar los parámetros de una línea recta que son el intercepto y la pendiente para minimizar el error (Mora, 2009).

Paso 6: Calcular los parámetros CMD acorde a la función seleccionada por el alineamiento. Analizar las curvas de densidad de falla, acumulada de fallas, confiabilidad y tasa de falla lambda. Realizar los pronósticos de curvas y parámetros. Con la ayuda de Excel y las formulas correspondientes se calcula el MTBF y MTTR para calcular la disponibilidad inherente de cada equipo. Las curvas resultado del análisis fueron obtenidas mediante el software RAM (Mora, 2007) y corroborados por FIASOFT. Finalmente se debe verificar el patrón y ajustar

pronósticos CMD. Analizar los parámetros en el tiempo. Definir una estrategia de mantenimiento acorde a los parámetros.

Cabe recalcar que una vez obtenidos los parámetros CMD de cada uno de los equipos analizados se conjugaran en un solo sistema, el sistema de reinyección de agua. Para conjugar estos parámetros se parte del hecho de que los equipos se encuentran en una estructura en paralelo o redundante activa. Esta conjunción a parte del cálculo en Excel realizado es corroborada por el “Software de Ingeniería de Confiabilidad y Riesgo ICR versión 12.02.0.5 desarrollado por CEANI, SIANI y Universidad de las Palmas de la Gran Canaria.

De la misma forma se debe indicar que para la disponibilidad del sistema de reinyección de agua se utilizó la técnica estadística de simulación Montecarlo, esto mediante la ayuda del software: “SIM 1.7 Simulador Montecarlo para RAMS”, autor: Ing. Blas J Galván, PhD para CEANI, SIANI y Universidad de las Palmas de la Gran Canaria.

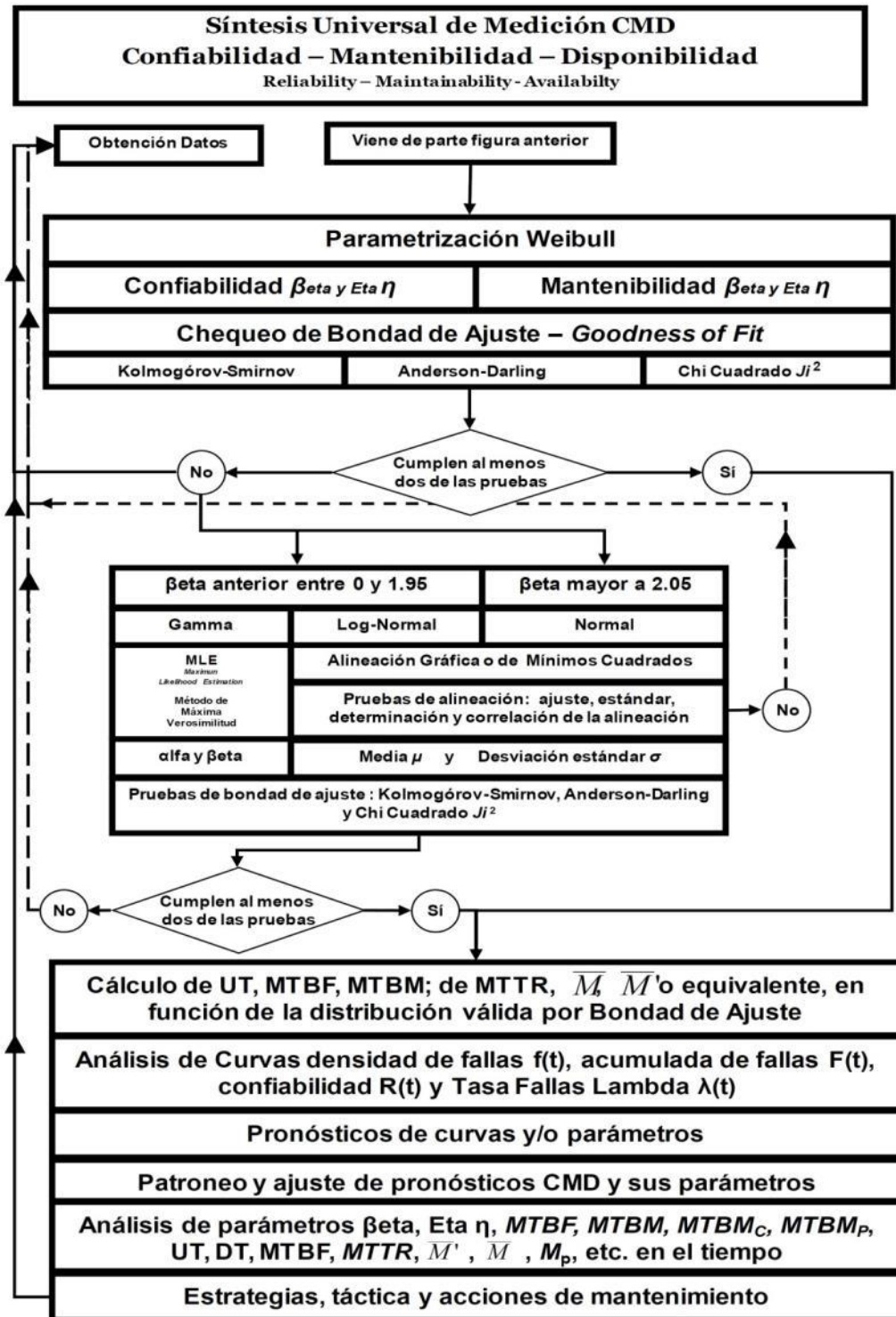


**Figura 3-1.** Modelo universal e integral, propuesto para la medición,

Fuente: (Mora, 2007)

Continúa en la siguiente página

Figura 2. Continuación





### **3.5.1. Contexto Operacional del Sistema**

El caudal de reinyección de agua varía de acuerdo a las necesidades operativas, incremento de corte de agua, niveles de tanque u otros procesos requeridos. Actualmente se encuentra en los rangos de 60 000 a 75 000 barriles diarios de agua de producción. Para controlar este parámetro se cuenta con una válvula reguladora de caudal en la línea común de reinyección hacia los pozos inyectoros en la plataforma Palo Azul A y recientemente hacia el Palo Azul C.

En Palo Azul se cuenta con la infraestructura física de bombeo que permite la reinyección diaria de agua de formación. Para la tarea se tiene cuatro bombas centrífugas tipo booster marca Goulds Pumps, tres bombas horizontales Horizontal Pump System HPS (2 bombas marcas Schlumberger y una General Electric) y dos bombas Split Case marca Sulzer.

Cada bomba centrífuga tipo booster está diseñada para movilizar un caudal de 803 gpm. (27 530 barriles por día). Las cuatro bombas (P-1503A/B/C/D) se encuentran en paralelo por lo que teóricamente movilizarían un caudal de 3212 gpm a una presión de 51.8 psi (110 100 barriles por día). Sin embargo se comprueba que en condiciones reales las cuatro bombas booster en paralelo a una frecuencia nominal de 60 Hz (ya que no poseen variador de frecuencia) alcanzan a bombear valores cercanos a las 80 000 barriles de agua por día a una presión de 60 psi.

Las bombas HPS (P-1501C/D) son idénticas y los datos de placa indican que pueden manejar 17 500 barriles de agua por día a una presión de 2 500 psi a 60 Hz. Su principio de funcionamiento es de bombas dispuestas en serie, donde cada etapa (impulsor) incrementa la presión del fluido manteniendo el caudal. Las dos bombas son marca Schlumberger de la división REDA. Cada bomba está formada por tres cuerpos donde se alojan sus impulsores.

La bomba HPS (P-1501E) es una bomba General Electric. Que indica que puede manejar 30 000 barriles por día a una presión de 2 500 psi a una frecuencia de 60 Hz. Al igual que las dos primeras su principio de funcionamiento es de los impulsores dispuestos en serie para aumentar la presión y mantener su caudal. Cuenta con instrumentos que indican parámetros básicos así como sensores de vibración, temperatura y sobre-corriente.



**Figura 3-2.** Motor eléctrico de bomba P-1501 E,

**Fuente:** Autor.

Las bombas P-1501A y P-1501 B tipo Split Case marca Sulzer 6x8x12AX MSSD 12STG, son dos bombas idénticas que pueden manejar nominalmente 1 133 gpm (38 850 barriles de agua por día) con una presión diferencial de 2 500 psi. Son bombas centrifugas balanceadas y bipartidas que pueden manejar grandes caudales y presiones. Su aplicación principal es precisamente agua disposal de estaciones petroleras. Están alimentadas por un motor eléctrico de 2500 hp.



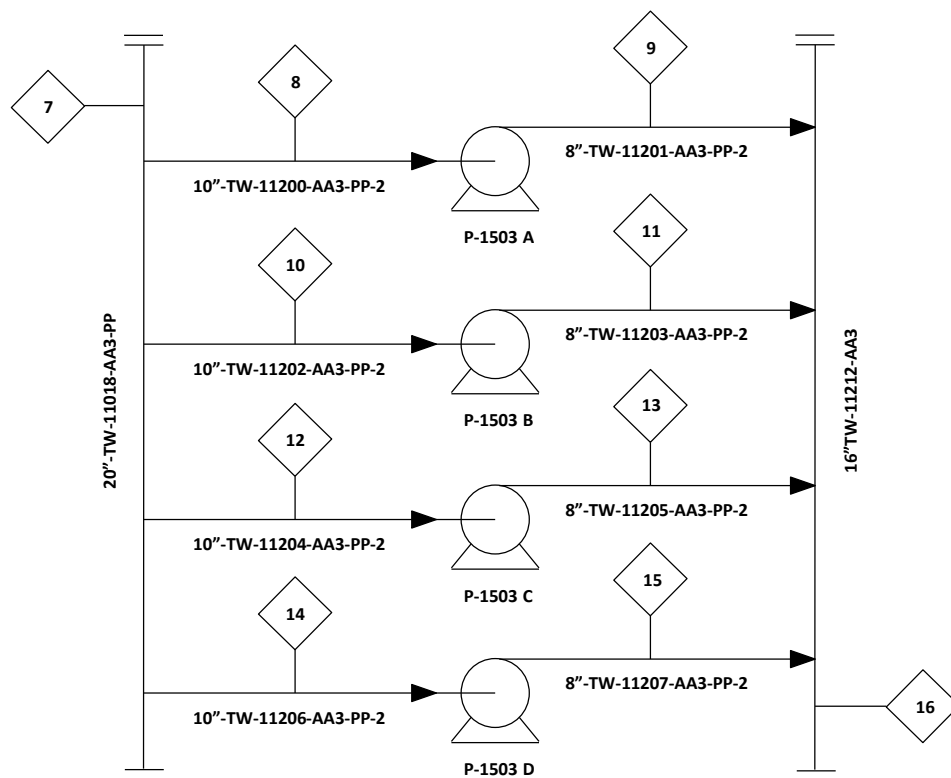
**Figura 3-3.** Bomba P-1501B, marca Sulzer,

**Fuente:** Autor.

Las bombas Sulzer no contaban con variador de frecuencia. En Enero 2014, se instaló sus respectivos variadores.

En la práctica el caudal que maneja cada bomba Sulzer a 60 Hz es aproximadamente 30 000 barriles de agua por día. La instrumentación que mantienen es de última generación, cuentan con sensores de vibración, temperatura, movimiento axial, presión, y niveles de lubricantes. Su sistema de sellado fue fortalecido con sellos mecánicos de última generación.

Los tanques que se utilizan al momento en el sistema de agua de reinyección son el tanque de contingencias T-1402 y los tanques de lavado T-1501 A/B.



**Figura 3-4.** Esquema del proceso para las bombas booster de agua de producción.

**Fuente:** “Cálculo Hidráulico Bomba de 30 000 barriles en CPF” –AZULEC, 18B003-ZPF-10-CLC-001, Abril del 2011

El status de los tanques, o en otras palabras la función de los activos, se encuentra en falla ya que el tanque T-1402 sufrió un colapso interno a mediados del año 2013 y su arreglo se encuentra aún en la fase final, adicionalmente el tanque T-1501A se encuentra limitado en su disponibilidad por la cantidad de solidos depositados en el mismo, su limpieza aún está en la etapa de planeación.

Al momento se encuentra operativo el tanque T-1501B. El subsistema de tanque de servicio del sistema de agua de reinyección se encuentra limitado ya que su capacidad receptora y de contingencia está condicionada. De este punto nacieron serios problemas al sistema de agua de reinyección.

En el literal 4.3 del Anexo 01, Bomba de 30 000 en CPF, Cálculo hidráulico [Pg.4 de 18] se explica el funcionamiento del sistema. Se debe aclarar que al momento la presión de descarga de las bombas booster es de 60 psi.

En el literal 5.3 del Anexo 01, se puede apreciar los diferentes escenarios que se previeron para inyectar una cantidad de agua determinada.

Durante años anteriores se ha migrado a diferentes escenarios por causas operacionales, funcionales, confiabilidad o de disponibilidad entre otras.

Se indaga al departamento de Operaciones de Palo Azul que el corte de agua en el bloque 18 incrementará hasta unos 90 000 barriles de agua diarios con la inclusión de nuevos pozos para finales del año 2017. Al igual se infiere que el corte de agua llegará a estabilizarse durante un periodo de tiempo considerable.

**El objetivo del presente estudio se pone como frontera el fin de año del 2017 y las bombas principales del sistema de reinyección de agua (P-1501A/B/C/D) para deducir los mejores indicadores y recomendaciones durante el mismo.**

### **3.5.2. Obtención de Datos**

Del sistema Maximo IBM se extrajo las diferentes órdenes de trabajo referente a cada una de las bombas del sistema de reinyección de agua. Estas órdenes de trabajo en primera instancia abarcan las que implican parada de función del activo como las que no implican parar el activo. Seguidamente las órdenes son discriminadas en función de las que en realidad recayeron por una parada de la función del activo.

La Tabla 01 contiene las órdenes de trabajo discriminadas para la bomba P-1501A, la primera de las bombas a ser analizadas, allí constan su fecha de ejecución, el área ejecutora y el tiempo de ejecución, es importante aclarar que la tabla está ordenada cronológicamente desde la más antigua hasta la más reciente.

### ***3.5.3. Determinación de los tiempos operativos y tiempos de reparación.***

La Tabla 01, está caracterizada por las columnas: OT, que es el número de orden de trabajo con el que se ejecutó la tarea, Descripción: que es la tarea con la que se describe los trabajos realizados, UT: donde se muestra la diferencia en horas desde su última falla hasta el nuevo evento no deseado y DT: que se muestra el tiempo que tomo las tareas para regresar a la función del activo. La Tabla 02 es donde se muestra los tiempos operativos y de reparación de la bomba P-1501A.

La misma analogía de los tiempos operativos y de reparación se la realizo en las bombas P-1501B, P-1501C, P-1501D y P-1501E, sus resultados se muestran en los Anexos 02, 03, 04 y 05 respectivamente.

**Tabla 3-1.** Base de datos de fallas de la bomba P-1501A. **Fuente:** Maximo Oil & Gas – Autor.

OT	DESCRIPCION	TIPO	AREA	FECHA	UT (horas)	DT(horas)
OT-110215247	LIMPIEZA DE FILTROS DE BOMBA F-P1501A (PA)	PMP	CR-PA-ME	8/1/2011 9:25:00 AM		
OT-110215247	LIMPIEZA DE FILTROS DE BOMBA F-P1501A (PA)	PMP	CR-PA-ME	8/1/2011 11:00:00 AM	4:00:00	1:35:00
OT-110265893	LIMPIEZA DE FILTROS DE BOMBA F-P1501A (PA)	PMP	CR-PA-ME	8/1/2011 3:00:00 PM		
OT-110265893	LIMPIEZA DE FILTROS DE BOMBA F-P1501A (PA)	PMP	CR-PA-ME	8/1/2011 5:00:00 PM	220:00:00	2:00:00
OT-110295811	CAMBIO DE SELLO MECANICO DE BOMBA P- 1501 A	CME	CR-PA-ME	8/10/2011 9:00:00 PM		
OT-110295811	CAMBIO DE SELLO MECANICO DE BOMBA P- 1501 A	CME	CR-PA-ME	8/11/2011 7:00:00 AM	3291:00:00	10:00:00
OT-110320801	LIMPIEZA DE LOS FILTROS DE SUCCION DE LA BOMBA DE INYECCION DE AGUA LA P- 1501A (PA)	CME	CR-PA-ME	12/26/2011 10:00:00 AM		
OT-110320801	LIMPIEZA DE LOS FILTROS DE SUCCION DE LA BOMBA DE INYECCION DE AGUA LA P- 1501A (PA)	CME	CR-PA-ME	12/26/2011 12:00:00 PM	1321:00:00	2:00:00
OT-120052053	CALIBRAR PIT-T1501A-1 VALORES ERRONEOS (PA) PAUCARM	CME	CR-PA-IN	2/19/2012 1:00:00 PM		
OT-120052053	CALIBRAR PIT-T1501A-1 VALORES ERRONEOS (PA) PAUCARM	CME	CR-PA-IN	2/19/2012 2:25:00 PM	1908:35:00	1:25:00
OT-120126985	DESTRABAMIENTO DE VALVULA YARWAY DE BOMBA P-1501 A (MEC) (PA)	CMP	CR-PA-ME	5/9/2012 3:00:00 AM		

OT-120126985	DESTRABAMIENTO DE VALVULA YARWAY DE BOMBA P-1501 A (MEC) (PA)	CMP	CR-PA-ME	5/9/2012 7:00:00 AM	3144:00:00	4:00:00
OT-120244567	REVISION DE TEMPERATURA DE VARIADOR DE FRECUENCIA P-1501A (AA) (PA)	CME	CR-PA-EL	9/17/2012 7:00:00 AM		
OT-120244567	REVISION DE TEMPERATURA DE VARIADOR DE FRECUENCIA P-1501A (AA) (PA)	CME	CR-PA-EL	9/18/2012 7:00:00 PM	2940:00:00	36:00:00
OT-130022944	MNT PYT INSTALACION DE BOMBA SULZER P-1501A (MEC) (PA)	PYT	CR-PA-ME	1/19/2013 7:00:00 AM		
OT-130022944	MNT PYT INSTALACION DE BOMBA SULZER P-1501A (MEC) (PA)	PYT	CR-PA-ME	1/25/2013 5:00:00 PM	456:00:00	154:00:00
OT-130057987	MNT PYT PRUEBAS FUNCIONALES DE MOTOR-ARRANCADOR P 1501 A (PA)	PYT	CR-PA-EL	2/13/2013 5:00:00 PM		
OT-130057987	MNT PYT PRUEBAS FUNCIONALES DE MOTOR-ARRANCADOR P 1501 A (PA)	PYT	CR-PA-EL	2/14/2013 11:30:00 AM	259:30:00	18:30:00
OT-130076065	REPARACION DE SELLOS MECANICOS DE BOMBA P-1501A (PA)	CME	CR-PA-ME	2/25/2013 7:00:00 AM		
OT-130076065	REPARACION DE SELLOS MECANICOS DE BOMBA P-1501A (PA)	CME	CR-PA-ME	3/2/2013 5:00:00 PM	476:00:00	130:00:00
OT-130109865	LMPIEZA DE FILTROS DE BOMBA F-P1501A (PA)	PMP	CR-PA-ME	3/22/2013 1:00:00 PM		
OT-130109865	LMPIEZA DE FILTROS DE BOMBA F-P1501A (PA)	PMP	CR-PA-ME	3/22/2013 4:00:00 PM	309:00:00	3:00:00
OT-130131014	COLOCACION DE FLANGE EN LINEA DE DRENAJE P-1501A (PA)	PYT	CR-PA-ME	4/4/2013 1:00:00 PM		
OT-130131014	COLOCACION DE FLANGE EN LINEA DE DRENAJE P-1501A (PA)	PYT	CR-PA-ME	4/4/2013 5:00:00 PM	254:00:00	4:00:00
OT-130143275	LIMPIEZA DE FILTROS DE BOMBA INYECCION AGUA F-P1501A (PA)	PMP	CR-PA-ME	4/15/2013 7:00:00 AM		



OT-130143275	LIMPIEZA DE FILTROS DE BOMBA INYECCION AGUA F-P1501A (PA)	PMP	CR-PA-ME	4/15/2013 9:00:00 AM	142:00:00	2:00:00
OT-130151768	LIMPIEZA DE FILTROS DE BOMBA F-P1501A (PA)	PMP	CR-PA-ME	4/21/2013 7:00:00 AM		
OT-130151768	LIMPIEZA DE FILTROS DE BOMBA F-P1501A (PA)	PMP	CR-PA-ME	4/21/2013 8:00:00 AM	95:30:00	1:00:00
OT-130160369	MONTAJE, INSTALACION DE RTDS EN LINEAS DE FLUJO DE AGUA DE SELLOS P-1501A (PA) ANDRADED	PYT	CR-PA-IN	4/25/2013 7:30:00 AM		
OT-130160369	MONTAJE, INSTALACION DE RTDS EN LINEAS DE FLUJO DE AGUA DE SELLOS P-1501A (PA) ANDRADED	PYT	CR-PA-IN	4/25/2013 5:00:00 PM	974:00:00	9:30:00
OT-130077375	INSTALAR CONTROLADOR DELTAV BOMBAS P-1501A/B (PA)	PYT	CR-PA-AEE	6/5/2013 7:00:00 AM		
OT-130077375	INSTALAR CONTROLADOR DELTAV BOMBAS P-1501A/B (PA)	PYT	CR-PA-AEE	6/6/2013 1:00:00 PM	23:30:00	30:00:00
OT-130210253	FILTRO SUCCION BOMBA P1501A	PMP	CR-PA-ME	6/7/2013 12:30:00 PM		
OT-130210253	FILTRO SUCCION BOMBA P1501A	PMP	CR-PA-ME	6/10/2013 2:30:00 PM	1702:30:00	74:00:00
OT-130295756	MNT PYT IMPLEMENTACION SISTEMA DE ALIVIO DE PRESION EN BOMBAS P-1501A/B (OBJETIVO K.SOLIS) (PA)	PYT	CR-PA-ME	8/20/2013 1:00:00 PM		
OT-130295756	MNT PYT IMPLEMENTACION SISTEMA DE ALIVIO DE PRESION EN BOMBAS P-1501A/B (OBJETIVO K.SOLIS) (PA)	PYT	CR-PA-ME	8/30/2013 6:00:00 PM	326:00:00	245:00:00
OT-130354581	DIRECCIONAMIENTO DE AGUA ENFRIAMIENTO DE SELLOS DE LAS P-1501A/B A SUMIDERO (REALF)	PYT	CR-PA-ME	9/13/2013 8:00:00 AM		
OT-130354581	DIRECCIONAMIENTO DE AGUA ENFRIAMIENTO DE SELLOS DE LAS P-1501A/B	PYT	CR-PA-ME	9/13/2013 1:00:00 PM	930:00:00	5:00:00

A SUMIDERO (REALF)

OT-130441239	LIMPIEZA DE STRAINER P-1501A/B (QUINGAJO-SOLISK)	PBP	CR-PA-ME	10/22/2013 7:00:00 AM		
OT-130441239	LIMPIEZA DE STRAINER P-1501A/B (QUINGAJO-SOLISK)	PBP	CR-PA-ME	10/22/2013 11:30:00 AM	892:30:00	4:30:00
OT-130517110	REVISAR SEÑALES DEL PANEL BENTLY NEVADA DE BOMBA P-1501A PAUCARM	CMP	CR-PA-IN	11/28/2013 4:00:00 PM		
OT-130517110	REVISAR SEÑALES DEL PANEL BENTLY NEVADA DE BOMBA P-1501A PAUCARM	CMP	CR-PA-IN	11/28/2013 4:30:00 PM	1382:30:00	0:30:00
OT-140042848	CAMBIO DE VALVULA 10X150 EN LINEA DE SUCCION P-1501A (PA)(Chavezb)	CMP	CR-PA-ME	1/25/2014 7:00:00 AM		
OT-140042848	CAMBIO DE VALVULA 10X150 EN LINEA DE SUCCION P-1501A (PA)(Chavezb)	CMP	CR-PA-ME	1/25/2014 12:00:00 PM	3646:00:00	5:00:00
OT-140553606	LIMPIEZA DE INDICADORES DE FLUJO CAUDALIMETROS AGUA DE SELLOS LADO ACOPLE DE LA P-1501A (PA) ORTIZO	CMP	CR-PA-IN	6/26/2014 10:00:00 AM		
OT-140553606	LIMPIEZA DE INDICADORES DE FLUJO CAUDALIMETROS AGUA DE SELLOS LADO ACOPLE DE LA P-1501A (PA) ORTIZO	CMP	CR-PA-IN	6/26/2014 1:30:00 PM	17:30:00	3:30:00
OT-140558613	LIMPIEZA DE FILTROS DE LA BOMBA SULZER P-1501A (PA) KLEVER. S	PMP	CR-PA-ME	6/27/2014 7:00:00 AM		
OT-140558613	LIMPIEZA DE FILTROS DE LA BOMBA SULZER P-1501A (PA) KLEVER. S	PMP	CR-PA-ME	6/27/2014 8:30:00 AM	748:30:00	1:30:00
OT-140674454	LIMPIEZA DE FILTROS DE LA P-1501A (PA) KLEVER. S	PBP	CR-PA-ME	7/28/2014 1:00:00 PM		
OT-140674454	LIMPIEZA DE FILTROS DE LA P-1501A (PA) KLEVER. S	PBP	CR-PA-ME	7/28/2014 2:00:00 PM	983:30:00	1:00:00

OT-140793878	LIMPIEZA DE FILTROS DE LAS P-1501A/B (PA)LARAR.	PBP	CR-PA-ME	9/7/2014 1:30:00 PM		
OT-140793878	LIMPIEZA DE FILTROS DE LAS P-1501A/B (PA)LARAR.	PBP	CR-PA-ME	9/7/2014 4:30:00 PM	1316:30:00	3:00:00
OT-141022554	CONSTRUCCION DE FILTROS P-1501A (PA)PASCUMAL G.	PYT	CR-PA-ME	11/1/2014 1:00:00 PM		
OT-141022554	CONSTRUCCION DE FILTROS P-1501A (PA)PASCUMAL G.	PYT	CR-PA-ME	11/1/2014 4:00:00 PM	285:00:00	3:00:00
OT-141064719	MNT CME CONSTRUCCION PROVISIONAL LINEA ENFRIAMIENTO DE SELLOS MECANICOS P-1501A (PA) FERNANDO. CH	CME	CR-PA-ME	11/13/2014 1:00:00 PM		
OT-141064719	MNT CME CONSTRUCCION PROVISIONAL LINEA ENFRIAMIENTO DE SELLOS MECANICOS P-1501A (PA) FERNANDO. CH	CME	CR-PA-ME	11/13/2014 6:00:00 PM	360:00:00	5:00:00
OT-141122210	MNT CME CAMBIO DE SELLO LADO ACOPLA BOMBA P-1501A (PA)(K.SOLIS)	CME	CR-PA-ME	11/28/2014 6:00:00 PM		
OT-141122210	MNT CME CAMBIO DE SELLO LADO ACOPLA BOMBA P-1501A (PA)(K.SOLIS)	CME	CR-PA-ME	11/29/2014 3:00:00 AM	53:00:00	9:00:00
OT-141132826	INSTALACIÓN DE TUBERÍA, CABLEADO Y SENSOR DE TEMPERATURA EN LA CARCASA DE LA P-1501A CABEZASW	PYT	CR-PA-IN	12/1/2014 8:00:00 AM		
OT-141132826	INSTALACIÓN DE TUBERÍA, CABLEADO Y SENSOR DE TEMPERATURA EN LA CARCASA DE LA P-1501A CABEZASW	PYT	CR-PA-IN	12/3/2014 9:00:00 PM	258:00:00	61:00:00
OT-141176288	MNT INSTALACION DE TOMAMUESTRAS EN SUCCION Y DESCARGA DE LA P1501A (PA) TORRESS	PYT	CR-PA-IN	12/14/2014 3:00:00 PM		
OT-141176288	MNT INSTALACION DE TOMAMUESTRAS EN SUCCION Y DESCARGA DE LA P1501A (PA)	PYT	CR-PA-IN	12/15/2014 9:00:00 AM	693:00:00	18:00:00

TORRESS

OT-150056104	MNT CME REUBICACIÓN DE LA RTD DEL SELLO MECÁNICO DE LA BOMBA P-1501A (PA) CARRERAJ	PYT	CR-PA-IN	1/13/2015 6:00:00 AM		
OT-150056104	MNT CME REUBICACIÓN DE LA RTD DEL SELLO MECÁNICO DE LA BOMBA P-1501A (PA) CARRERAJ	PYT	CR-PA-IN	1/13/2015 6:00:00 PM	1022:00:00	12:00:00
OT-150224740	MNT PYT CONEXION DE ACOMETIDA ELECTRICA PARA TABLERO DE CONTROL DE BOMBA P-B75209 (PA)	PYT	CR-PA-EL	2/25/2015 8:00:00 AM		
OT-150224740	MNT PYT CONEXION DE ACOMETIDA ELECTRICA PARA TABLERO DE CONTROL DE BOMBA P-B75209 (PA)	PYT	CR-PA-EL	2/25/2015 5:00:00 PM	14:00:00	9:00:00
OT-150224709	MNT PYT CONSTRUCCION DE TABLERO ELECTRICO PARA BOMBA DE RECIRCULACION DE AGUA DE SELLOS (PA)	PYT	CR-PA-EL	2/26/2015 7:00:00 AM		
OT-150224709	MNT PYT CONSTRUCCION DE TABLERO ELECTRICO PARA BOMBA DE RECIRCULACION DE AGUA DE SELLOS (PA)	PYT	CR-PA-EL	3/2/2015 6:00:00 PM	2677:00:00	107:00:00
OT-130295556	MNT PYT INSTALACION DE SISTEMA DE RECUPERACION DE AGUA DE SELLOS DE BOMBAS SULZER P-1501A/B (PA)PASCUMAM	PYT	CR-PA-ME	6/22/2015 7:00:00 AM		
OT-130295556	MNT PYT INSTALACION DE SISTEMA DE RECUPERACION DE AGUA DE SELLOS DE BOMBAS SULZER P-1501A/B (PA)PASCUMAM	PYT	CR-PA-ME	6/22/2015 12:00:00 PM	1487:00:00	5:00:00
OT-150295887	LIMPIEZA DE FILTROS DE LA P-1501A (PA) KLEVER. S	PBP	CR-PA-ME	8/23/2015 11:00:00 AM		

OT-150295887	LIMPIEZA DE FILTROS DE LA P-1501A (PA) KLEVER. S	PBP	CR-PA-ME	8/23/2015 5:00:00 PM	1192:00:00	6:00:00
OT-150652852	REVISION DE VÁLVULA YARWAY DE BOMBA P-1501 A	CMP	CR-PA-ME	10/12/2015 9:00:00 AM		
OT-150652852	REVISION DE VÁLVULA YARWAY DE BOMBA P-1501 A	CMP	CR-PA-ME	10/13/2015 5:00:00 PM	861:05:00	32:00:00
OT-150992263	LIMPIEZA DE INDICADORES DE FLUJO CAUDALIMETROS AGUA DE SELLOS LADO ACOPLE DE LA P-1501A (PA) ORTIZO	CMP	CR-PA-IN	11/18/2015 2:05:00 PM		
OT-150992263	LIMPIEZA DE INDICADORES DE FLUJO CAUDALIMETROS AGUA DE SELLOS LADO ACOPLE DE LA P-1501A (PA) ORTIZO	CMP	CR-PA-IN	11/18/2015 4:25:00 PM	974:00:00	2:20:00
OT-151194836	ACTUALIZAR CONTROLADOR DELTAV BOMBAS P-1501A/B (PA)	PYT	CR-PA-AEE	12/29/2015 6:25:00 AM		
OT-151194836	ACTUALIZAR CONTROLADOR DELTAV BOMBAS P-1501A/B (PA)	PYT	CR-PA-AEE	12/31/2015 1:50:00 PM	486:40:00	55:25:00
OT-151591110	LIMPIEZA DE FILTROS DE LA P-1501A (PA) QUINGAJÓ	CMP	CR-PA-ME	1/20/2016 8:30:00 PM		
OT-151591110	LIMPIEZA DE FILTROS DE LA P-1501A (PA) QUINGAJÓ	CMP	CR-PA-ME	1/20/2016 10:25:00 PM	1344:00:00	1:55:00
				3/16/2016 10:25:00 PM		

#### **3.5.4. Estimación de la no confiabilidad y mantenibilidad.**

Se recolectaron 40 datos en la Tabla 01 para la bomba P-1501A, que son la base de cálculo para encontrar la curva de confiabilidad así como su ecuación. Mora (2007) manifiesta para simular las fallas y/o reparaciones deben ser de al menos 31 datos de cada uno (Teorema del límite central); de la misma manera también manifiesta “Es importante volver a resaltar la importancia de tener gran cantidad de datos de falla, tiempos útiles, reparaciones, etc., siquiera al menos en una cifra total evaluada de tiempo mayor a 10 veces el MTTR.”

Después de hacer un refinamiento de los tiempos de buen funcionamiento UT. Se toman los UT iguales y solo se deja uno, el que tenga el  $F(t)$  más crítico a la luz de las fallas. (Mora 2007). Es así que se obtuvo la Tabla 2: Tiempos UT y DT refinados para la bomba P-1501A, El número de datos final fue de 31.

Una vez obtenidos UT y DT, se aplican los métodos de estimación sugeridos por Mora 2007, para encontrar la no confiabilidad y la mantenibilidad.

El método ikaésimo, fue el seleccionado para el cálculo en Excel. En la Tabla 03: Métodos de estimación de parámetros de No Confiabilidad de la bomba P-1501A, se puede observar los valores obtenidos para los 31 datos.

**Tabla 3-1.** Tiempos de buen funcionamiento UT y de down time DT refinados de la bomba P1501A. **Fuente:** Autor

N°	FINAL	
	UT	DT
1	224	0,5
2	258	1
3	259	1,41
4	309	1,5
5	326	1,91
6	413	2
7	456	2,34
8	476	3
9	486,67	3,58
10	491,5	4
11	693	4,5
12	748,5	5
13	861,08	5
14	892,5	6
15	930	6
16	974	6
17	983,5	8,5
18	997,5	10
19	1036	14
20	1192	18
21	1321	18,5
22	1382,5	32
23	1487	36
24	1601,5	39,5
25	1702,5	55,25
26	1908,58	61
27	2677	74

28	2940	107
29	3144	130
30	3291	154
31	3663,5	245

**Tabla 3-2.** Métodos de estimación y cálculo de la no confiabilidad de P-1501A.

**Fuente:** Autor

<b>J</b>	<b>DATOS DE HORAS DE OPERACIÓN SIN FALLAS DE MENOR A MAYOR (HORAS)</b>	<b>IKAESIMO</b>	<b>RANGO MEDIANAS</b>	<b>BERNARD</b>	<b>KAPLAN &amp; MEIER</b>
1	224	0,03125	0,02210	0,02229	0,02229
2	258	0,06250	0,05560	0,05414	0,04510
3	259	0,09375	0,08530	0,08599	0,06844
4	309	0,12500	0,11720	0,11783	0,09231
5	326	0,15625	0,14910	0,14968	0,11672
6	413	0,18750	0,18090	0,18153	0,14168
7	456	0,21875	0,21280	0,21338	0,16719
8	476	0,25000	0,24470	0,24522	0,19327
9	486,67	0,28125	0,27670	0,27707	0,21993
10	491,5	0,31250	0,30860	0,30892	0,24717
11	693	0,34375	0,34050	0,34076	0,27500
12	748,5	0,37500	0,37240	0,37261	0,30343
13	861,08	0,40625	0,40430	0,40446	0,33248



14	892,5	0,43750	0,43620	0,43631	0,36214
15	930	0,46875	0,46810	0,46815	0,39242
16	974	0,50000	0,50000	0,50000	0,42335
17	983,5	0,53125	0,53190	0,53185	0,45492
18	997,5	0,56250	0,56380	0,56369	0,48715
19	1036	0,59375	0,59570	0,59554	0,52004
20	1192	0,62500	0,62760	0,62739	0,55361
21	1321	0,65625	0,67950	0,65924	0,58786
22	1382,5	0,68750	0,69150	0,69108	0,62281
23	1487	0,71875	0,72340	0,72293	0,65846
24	1601,5	0,75000	0,75530	0,75478	0,69483
25	1702,5	0,78125	0,78720	0,78662	0,73193
26	1908,58	0,81250	0,81910	0,81847	0,76976
27	2677	0,84375	0,85100	0,85032	0,80834
28	2940	0,87500	0,88280	0,88217	0,84767
29	3144	0,90625	0,91470	0,91401	0,88778
30	3291	0,93750	0,94650	0,94586	0,92867
31	3663,5	0,96875	0,97790	0,97771	0,97035

Con los datos de Down Time de la Tabla 02 y aplicando los métodos de estimación se obtiene la mantenibilidad de la bomba P-1501A.

**Tabla 3-3.** Métodos de estimación y cálculo de la mantenibilidad de P-1501A.

<b>J</b>	<b>DATOS DE HORAS DE REPARACIÓN MENOR A MAYOR (HORAS)</b>	<b>I-KAESIMO</b>	<b>RANGO MEDIANAS</b>	<b>BERNARD</b>	<b>KAPLAN &amp; MEIER</b>
1	0,5	<b>0,03125</b>	0,02210	0,02229	0,02229

2	1	<b>0,06250</b>	0,05560	0,05414	0,04510
3	1,41	<b>0,09375</b>	0,08530	0,08599	0,06844
4	1,5	<b>0,12500</b>	0,11720	0,11783	0,09231
5	1,91	<b>0,15625</b>	0,14910	0,14968	0,11672
6	2	<b>0,18750</b>	0,18090	0,18153	0,14168
7	2,34	<b>0,21875</b>	0,21280	0,21338	0,16719
8	3	<b>0,25000</b>	0,24470	0,24522	0,19327
9	3,58	<b>0,28125</b>	0,27670	0,27707	0,21993
10	4	<b>0,31250</b>	0,30860	0,30892	0,24717
11	4,5	<b>0,34375</b>	0,34050	0,34076	0,27500
12	5	<b>0,37500</b>	0,37240	0,37261	0,30343
13	5	<b>0,40625</b>	0,40430	0,40446	0,33248
14	6	<b>0,43750</b>	0,43620	0,43631	0,36214
15	6	<b>0,46875</b>	0,46810	0,46815	0,39242
16	6	<b>0,50000</b>	0,50000	0,50000	0,42335
17	8,5	0,53125	<b>0,53190</b>	0,53185	0,45492
18	10	0,56250	<b>0,56380</b>	0,56369	0,48715
19	14	0,59375	<b>0,59570</b>	0,59554	0,52004
20	18	0,62500	<b>0,62760</b>	0,62739	0,55361
21	18,5	0,65625	<b>0,67950</b>	0,65924	0,58786
22	32	0,68750	<b>0,69150</b>	0,69108	0,62281
	36				
23		0,71875	<b>0,72340</b>	0,72293	0,65846
24	39,5	0,75000	<b>0,75530</b>	0,75478	0,69483
25	55,25	0,78125	<b>0,78720</b>	0,78662	0,73193
26	61	0,81250	<b>0,81910</b>	0,81847	0,76976
27	74	0,84375	<b>0,85100</b>	0,85032	0,80834
28	107	0,87500	<b>0,88280</b>	0,88217	0,84767
29	130	0,90625	<b>0,91470</b>	0,91401	0,88778
30	154	0,93750	<b>0,94650</b>	0,94586	0,92867
31	245	0,96875	<b>0,97790</b>	0,97771	0,97035

Fuente: Autor

De igual manera de los anexos 02, 03, 04 y 05 “Bases de datos de fallas de la bomba P-1501B, C, D y E” respectivamente se realizó el refinamiento de los UT y DT con las consideraciones mencionadas para la bomba P-1501A; Aplicando los métodos de estimación I-Kaésimo, Rango de Medianas, Bernard y Kaplan&Meir, se obtuvieron las Tablas de los Métodos de Estimación y cálculos de la No Confiabilidad y de la Mantenibilidad para las bombas P-1501B, P-1501C, P-1501D y P-1501E, las que se muestran en las siguientes páginas. Cabe señalar que todos los métodos de estimación la media alcanza el 50% a excepción de Kaplan-Mier que no la alcanza, es por eso que Mora (2007) no recomienda el uso de la misma.

**Tabla 3-4** Métodos de estimación y cálculo de la no confiabilidad de P-1501B.

<b>J</b>	<b>HORAS DE OPERACIÓN SIN FALLAS DE MENOR A MAYOR (HORAS)</b>	<b>I- KAESIMO</b>	<b>RANGO MEDIANAS</b>	<b>BERNARD</b>	<b>KAPLAN &amp; MEIER</b>
1	167,00	<b>0,03030</b>	0,02140	0,02160	0,02160
2	182,50	<b>0,06061</b>	0,06190	0,05247	0,04370
3	314,58	<b>0,09091</b>	0,08270	0,08333	0,06628
4	409,00	<b>0,12121</b>	0,11360	0,11420	0,08936
5	420,50	<b>0,15152</b>	0,14450	0,14506	0,11295
6	522,00	<b>0,18182</b>	0,17540	0,17593	0,13706
7	672,00	<b>0,21212</b>	0,20630	0,20679	0,16169
8	676,00	<b>0,24242</b>	0,23720	0,23765	0,18685
9	689,00	<b>0,27273</b>	0,26810	0,26852	0,21255
10	736,00	<b>0,30303</b>	0,29900	0,29938	0,23879
11	749,00	<b>0,33333</b>	0,32990	0,33025	0,26558
12	776,75	<b>0,36364</b>	0,36090	0,36111	0,29294
13	864,00	<b>0,39394</b>	0,39180	0,39198	0,32087
14	883,75	<b>0,42424</b>	0,42270	0,42284	0,34937
15	957,50	<b>0,45455</b>	0,45360	0,45370	0,37846
16	1128,50	<b>0,48485</b>	0,48450	0,48457	0,40815
17	1207,50	0,51515	<b>0,51550</b>	0,51543	0,43844
18	1240,00	0,54545	<b>0,54640</b>	0,54630	0,46934
19	1397,50	0,57576	<b>0,57730</b>	0,57716	0,50086
20	1558,00	0,60606	<b>0,60820</b>	0,60802	0,53301
21	1625,58	0,63636	<b>0,63920</b>	0,63889	0,56579
22	1627,00	0,66667	<b>0,67010</b>	0,66975	0,59923
23	1680,00	0,69697	<b>0,70100</b>	0,70062	0,63332
24	2060,00	0,72727	<b>0,73190</b>	0,73148	0,66808

25	2102,50	0,75758	<b>0,76280</b>	0,76235	0,70351
26	2127,50	0,78788	<b>0,79370</b>	0,79321	0,73963
27	2155,50	0,81818	<b>0,82470</b>	0,82407	0,77644
28	2198,00	0,84848	<b>0,85560</b>	0,85494	0,81395
29	2567,00	0,87879	<b>0,88650</b>	0,88580	0,85218
30	3058,00	0,90909	<b>0,91730</b>	0,91667	0,89113
31	3061,50	0,93939	<b>0,94810</b>	0,94753	0,93082
32	3306,50	0,96970	<b>0,97860</b>	0,97840	0,97125

Fuente: Autor

**Tabla 3-5** Métodos de estimación y cálculo de la mantenibilidad de P-1501B.

<b>J</b>	<b>HORAS DE REPARACIÓN</b>	<b>I- KAESIMO</b>	<b>RANGO MEDIANAS</b>	<b>BERNARD</b>	<b>KAPLAN &amp; MEIER</b>
	<b>MENOR A MAYOR (HORAS)</b>				
1	0,25	<b>0,03125</b>	0,02210	0,02229	0,02229
2	0,33	<b>0,06250</b>	0,05560	0,05414	0,04510
3	1,00	<b>0,09375</b>	0,08530	0,08599	0,06844
4	1,42	<b>0,12500</b>	0,11720	0,11783	0,09231
5	1,42	<b>0,15625</b>	0,14910	0,14968	0,11672
6	1,50	<b>0,18750</b>	0,18090	0,18153	0,14168
7	1,50	<b>0,21875</b>	0,21280	0,21338	0,16719
8	2,00	<b>0,25000</b>	0,24470	0,24522	0,19327
9	2,00	<b>0,28125</b>	0,27670	0,27707	0,21993
10	2,00	<b>0,31250</b>	0,30860	0,30892	0,24717
11	2,50	<b>0,34375</b>	0,34050	0,34076	0,27500
12	2,67	<b>0,37500</b>	0,37240	0,37261	0,30343
13	3,00	<b>0,40625</b>	0,40430	0,40446	0,33248
14	3,00	<b>0,43750</b>	0,43620	0,43631	0,36214
15	4,00	<b>0,46875</b>	0,46810	0,46815	0,39242

16	4,00	<b>0,50000</b>	0,50000	0,50000	0,42335
17	4,50	0,53125	<b>0,53190</b>	0,53185	0,45492
18	5,00	0,56250	<b>0,56380</b>	0,56369	0,48715
19	5,00	0,59375	<b>0,59570</b>	0,59554	0,52004
20	6	0,62500	<b>0,62760</b>	0,62739	0,55361
21	9,25	0,65625	<b>0,67950</b>	0,65924	0,58786
22	10	0,68750	<b>0,69150</b>	0,69108	0,62281
23	12	0,71875	<b>0,72340</b>	0,72293	0,65846
24	25	0,75000	<b>0,75530</b>	0,75478	0,69483
25	25,25	0,78125	<b>0,78720</b>	0,78662	0,73193
26	29,58	0,81250	<b>0,81910</b>	0,81847	0,76976
27	31	0,84375	<b>0,85100</b>	0,85032	0,80834
28	34	0,87500	<b>0,88280</b>	0,88217	0,84767
29	62,5	0,90625	<b>0,91470</b>	0,91401	0,88778
30	109	0,93750	<b>0,94650</b>	0,94586	0,92867
31	137,5	0,96875	<b>0,97790</b>	0,97771	0,97035

Fuente: Autor

**Tabla 3-6** Métodos de estimación y cálculo de la no confiabilidad de P-1501C.

Fuente: Autor

J	HORAS DE OPERACIÓN SIN FALLAS DE MENOR A MAYOR (HORAS)	I-KAESIMO	RANGO MEDIANAS	BERNARD	KAPLAN & MEIER
1	43,00	<b>0,04000</b>	0,02850	0,02869	0,02869
2	69,00	<b>0,08000</b>	0,06900	0,06967	0,05823
3	138,00	<b>0,12000</b>	0,10990	0,11066	0,08865
4	143,00	<b>0,16000</b>	0,15090	0,15164	0,11996

5	165,00	<b>0,20000</b>	0,19190	0,19262	0,15218
6	185,00	<b>0,24000</b>	0,23330	0,23361	0,18532
7	190	<b>0,28000</b>	0,27410	0,27459	0,21940
8	194,00	<b>0,32000</b>	0,31510	0,31557	0,25445
9	212,50	<b>0,36000</b>	0,35620	0,35656	0,29048
10	216,50	<b>0,40000</b>	0,39730	0,39754	0,32750
11	228	<b>0,44000</b>	0,43890	0,43852	0,36554
12	331,00	<b>0,48000</b>	0,47950	0,47951	0,40462
13	360,50	0,52000	<b>0,52050</b>	0,52049	0,44476
14	382,10	0,56000	<b>0,56160</b>	0,56148	0,48597
15	458,50	0,60000	<b>0,60270</b>	0,60246	0,52828
16	689	0,64000	<b>0,64380</b>	0,64344	0,57171
17	691,50	0,68000	<b>0,68490</b>	0,68443	0,61628
18	740,00	0,72000	<b>0,72990</b>	0,72541	0,66201
19	835	0,76000	<b>0,76700</b>	0,76639	0,70892
20	914,00	0,80000	<b>0,80810</b>	0,80738	0,75704
21	952,00	0,84000	<b>0,84910</b>	0,84836	0,80638
22	1.083,00	0,88000	<b>0,89010</b>	0,88934	0,85697
23	2.636,00	0,92000	<b>0,93110</b>	0,93033	0,90884
24	3.186,00	0,96000	<b>0,97150</b>	0,97131	0,96200

**Fuente:** Autor

**Tabla 3-7** Métodos de estimación y cálculo de la mantenibilidad de P-1501C.

<b>J</b>	<b>DATOS DE REPARACIÓN MENOR A MAYOR (HORAS)</b>	<b>I-KAESIMO</b>	<b>RANGO MEDIANAS</b>	<b>BERNARD</b>	<b>KAPLAN &amp; MEIER</b>
1	1,00	<b>0,04000</b>	0,02850	0,02869	0,02869
2	1,00	<b>0,08000</b>	0,06900	0,06967	0,05823
3	1,00	<b>0,12000</b>	0,10990	0,11066	0,08865
4	1,50	<b>0,16000</b>	0,15090	0,15164	0,11996
5	2,00	<b>0,20000</b>	0,19190	0,19262	0,15218
6	2,00	<b>0,24000</b>	0,23330	0,23361	0,18532
7	2,00	<b>0,28000</b>	0,27410	0,27459	0,21940
8	2,00	<b>0,32000</b>	0,31510	0,31557	0,25445
9	2,00	<b>0,36000</b>	0,35620	0,35656	0,29048
10	2,00	<b>0,40000</b>	0,39730	0,39754	0,32750
11	2,00	<b>0,44000</b>	0,43890	0,43852	0,36554
12	2,00	<b>0,48000</b>	0,47950	0,47951	0,40462
13	2,00	0,52000	<b>0,52050</b>	0,52049	0,44476
14	3,00	0,56000	<b>0,56160</b>	0,56148	0,48597
15	3,00	0,60000	<b>0,60270</b>	0,60246	0,52828
16	3,59	0,64000	<b>0,64380</b>	0,64344	0,57171
17	4,00	0,68000	<b>0,68490</b>	0,68443	0,61628
18	4,00	0,72000	<b>0,72990</b>	0,72541	0,66201
19	5,00	0,76000	<b>0,76700</b>	0,76639	0,70892
20	5,00	0,80000	<b>0,80810</b>	0,80738	0,75704
21	6,00	0,84000	<b>0,84910</b>	0,84836	0,80638
22	6,41	0,88000	<b>0,89010</b>	0,88934	0,85697
23	8,00	0,92000	<b>0,93110</b>	0,93033	0,90884
24	12,00	0,96000	<b>0,97150</b>	0,97131	0,96200

Fuente: Autor



**Tabla 3-8** Métodos de estimación y cálculo de la no confiabilidad de P-1501D.

**Fuente:** Autor

<b>J</b>	<b>DATOS DE OPERACIÓN SIN FALLAS DE MENOR A MAYOR (HORAS)</b>	<b>I-KAESIMO</b>	<b>RANGO MEDIANAS</b>	<b>BERNARD</b>	<b>KAPLAN &amp; MEIER</b>
1	69,00	<b>0,04167</b>	0,02970	0,02991	0,02991
2	109,50	<b>0,08333</b>	0,07190	0,07265	0,06076
3	119,00	<b>0,12500</b>	0,11460	0,11538	0,09256
4	190,00	<b>0,16667</b>	0,15730	0,15812	0,12532
5	191,00	<b>0,20833</b>	0,20020	0,20085	0,15908
6	193,50	<b>0,25000</b>	0,24300	0,24359	0,19384
7	214,50	<b>0,29167</b>	0,28580	0,28632	0,22964
8	264,00	<b>0,33333</b>	0,32860	0,32906	0,26648
9	281,00	<b>0,37500</b>	0,37150	0,37179	0,30440
10	305,00	<b>0,41667</b>	0,41430	0,41453	0,34341
11	329,50	<b>0,45833</b>	0,45720	0,45726	0,38353
12	386,50	<b>0,50000</b>	0,50000	0,50000	0,42479
13	455,00	0,54167	<b>0,54280</b>	0,54274	0,46721
14	457,00	0,58333	<b>0,58570</b>	0,58547	0,51081
15	740,00	0,62500	<b>0,62850</b>	0,62821	0,55562
16	861,00	0,66667	<b>0,67140</b>	0,67094	0,60165
17	1.038,00	0,70833	<b>0,71420</b>	0,71368	0,64894
18	1.289,00	0,75000	<b>0,75700</b>	0,75641	0,69751
19	1.394,50	0,79167	<b>0,79990</b>	0,79915	0,74738
20	3.500,00	0,83333	<b>0,84270</b>	0,84188	0,79858
21	3.999,00	0,87500	<b>0,88540</b>	0,88462	0,85113
22	4.588,50	0,91667	<b>0,92810</b>	0,92735	0,90507
23	9.253,00	0,95833	<b>0,97030</b>	0,97009	0,96041

**Fuente:** Autor

**Tabla 3-9** Métodos de estimación y cálculo de la mantenibilidad de P-1501D.

<b>DATOS DE</b>					
<b>REPARACIÓN</b>					
<b>J</b>	<b>MENOR A MAYOR (HORAS)</b>	<b>I-KAESIMO</b>	<b>RANGO MEDIANAS</b>	<b>BERNARD</b>	<b>KAPLAN &amp; MEIER</b>
1	1,00	<b>0,04167</b>	0,02850	0,02991	0,02991
2	1,00	<b>0,08333</b>	0,06900	0,07265	0,06076
3	1,00	<b>0,12500</b>	0,10990	0,11538	0,09256
4	1,00	<b>0,16667</b>	0,15090	0,15812	0,12532
5	1,00	<b>0,20833</b>	0,19190	0,20085	0,15908
6	1,50	<b>0,25000</b>	0,23330	0,24359	0,19384
7	2	<b>0,29167</b>	0,27410	0,28632	0,22964
8	2,00	<b>0,33333</b>	0,31510	0,32906	0,26648
9	2,00	<b>0,37500</b>	0,35620	0,37179	0,30440
10	2,00	<b>0,41667</b>	0,39730	0,41453	0,34341
11	2,00	<b>0,45833</b>	0,43890	0,45726	0,38353
12	2,00	<b>0,50000</b>	0,47950	0,50000	0,42479
13	2,00	0,54167	<b>0,52050</b>	0,54274	0,46721
14	2,00	0,58333	<b>0,56160</b>	0,58547	0,51081
15	2,00	0,62500	<b>0,60270</b>	0,62821	0,55562
16	3,00	0,66667	<b>0,64380</b>	0,67094	0,60165
17	4,00	0,70833	<b>0,68490</b>	0,71368	0,64894
18	4,50	0,75000	<b>0,72990</b>	0,75641	0,69751
19	5,00	0,79167	<b>0,76700</b>	0,79915	0,74738
20	6,00	0,83333	<b>0,80810</b>	0,84188	0,79858
21	18,00	0,87500	<b>0,84910</b>	0,88462	0,85113
22	27,00	0,91667	<b>0,89010</b>	0,92735	0,90507
23	32,00	0,95833	<b>0,93110</b>	0,97009	0,96041

Fuente: Autor

**Tabla 3-10** Métodos de estimación y cálculo de la no confiabilidad de P-1501E.**Fuente:** Autor

<b>DATOS DE</b>					
<b>OPERACIÓN SIN</b>					
<b>j</b>	<b>FALLAS DE</b>	<b>I-KAESIMO</b>	<b>RANGO</b>	<b>BERNARD</b>	<b>KAPLAN &amp;</b>
	<b>MENOR A</b>		<b>MEDIANAS</b>		<b>MEIER</b>
	<b>MAYOR (HORAS)</b>				
1	39,00	<b>0,03125</b>	0,02210	0,02229	0,02229
2	60,00	<b>0,06250</b>	0,05560	0,05414	0,04510
3	110,00	<b>0,09375</b>	0,08530	0,08599	0,06844
4	112,00	<b>0,12500</b>	0,11720	0,11783	0,09231
5	141,00	<b>0,15625</b>	0,14910	0,14968	0,11672
6	256,00	<b>0,18750</b>	0,18090	0,18153	0,14168
7	335	<b>0,21875</b>	0,21280	0,21338	0,16719
8	379,00	<b>0,25000</b>	0,24470	0,24522	0,19327
9	400,83	<b>0,28125</b>	0,27670	0,27707	0,21993
10	432,50	<b>0,31250</b>	0,30860	0,30892	0,24717
11	435,33	<b>0,34375</b>	0,34050	0,34076	0,27500
12	566,00	<b>0,37500</b>	0,37240	0,37261	0,30343
13	679,00	<b>0,40625</b>	0,40430	0,40446	0,33248
14	748,25	<b>0,43750</b>	0,43620	0,43631	0,36214
15	838,00	<b>0,46875</b>	0,46810	0,46815	0,39242
16	841,58	<b>0,50000</b>	0,50000	0,50000	0,42335
17	952,58	0,53125	<b>0,53190</b>	0,53185	0,45492
18	1.021,67	0,56250	<b>0,56380</b>	0,56369	0,48715
19	1105,08	0,59375	<b>0,59570</b>	0,59554	0,52004
20	1.149,00	0,62500	<b>0,62760</b>	0,62739	0,55361
21	1.315,25	0,65625	<b>0,67950</b>	0,65924	0,58786
22	1.389,00	0,68750	<b>0,69150</b>	0,69108	0,62281
23	1.421,00	0,71875	<b>0,72340</b>	0,72293	0,65846
24	1.879,50	0,75000	<b>0,75530</b>	0,75478	0,69483

25	2.033,00	0,78125	<b>0,78720</b>	0,78662	0,73193
26	2.105,00	0,81250	<b>0,81910</b>	0,81847	0,76976
27	2.211,50	0,84375	<b>0,85100</b>	0,85032	0,80834
28	2.232,00	0,87500	<b>0,88280</b>	0,88217	0,84767
29	3.135,00	0,90625	<b>0,91470</b>	0,91401	0,88778
30	5.156,00	0,93750	<b>0,94650</b>	0,94586	0,92867
31	6.831,00	0,96875	<b>0,97790</b>	0,97771	0,97035

Fuente: Autor

**Tabla 3-11** Métodos de estimación y cálculo de la mantenibilidad de P-1501E.

j	DATOS DE REPARACIÓN MENOR A MAYOR (HORAS)	I-KAESIMO	RANGO MEDIANAS	BERNARD	KAPLAN & MEIER
1	1	<b>0,03125</b>	0,02210	0,02229	0,02229
2	1	<b>0,06250</b>	0,05560	0,05414	0,04510
3	2	<b>0,09375</b>	0,08530	0,08599	0,06844
4	2	<b>0,12500</b>	0,11720	0,11783	0,09231
5	2	<b>0,15625</b>	0,14910	0,14968	0,11672
6	3	<b>0,18750</b>	0,18090	0,18153	0,14168
7	5	<b>0,21875</b>	0,21280	0,21338	0,16719
8	6	<b>0,25000</b>	0,24470	0,24522	0,19327
9	6,42	<b>0,28125</b>	0,27670	0,27707	0,21993
10	8,5	<b>0,31250</b>	0,30860	0,30892	0,24717
11	9	<b>0,34375</b>	0,34050	0,34076	0,27500
12	9,67	<b>0,37500</b>	0,37240	0,37261	0,30343
13	10	<b>0,40625</b>	0,40430	0,40446	0,33248
14	13	<b>0,43750</b>	0,43620	0,43631	0,36214
15	14	<b>0,46875</b>	0,46810	0,46815	0,39242
16	20	<b>0,50000</b>	0,50000	0,50000	0,42335

17	27,5	0,53125	<b>0,53190</b>	0,53185	0,45492
18	28	0,56250	<b>0,56380</b>	0,56369	0,48715
19	40,00	0,59375	<b>0,59570</b>	0,59554	0,52004
20	53,16	0,62500	<b>0,62760</b>	0,62739	0,55361
21	57	0,65625	<b>0,67950</b>	0,65924	0,58786
22	77	0,68750	<b>0,69150</b>	0,69108	0,62281
23	98	0,71875	<b>0,72340</b>	0,72293	0,65846
24	122	0,75000	<b>0,75530</b>	0,75478	0,69483
25	169,5	0,78125	<b>0,78720</b>	0,78662	0,73193
26	177	0,81250	<b>0,81910</b>	0,81847	0,76976
27	216	0,84375	<b>0,85100</b>	0,85032	0,80834
28	348,00	0,87500	<b>0,88280</b>	0,88217	0,84767
29	565,75	0,90625	<b>0,91470</b>	0,91401	0,88778
30	615	0,93750	<b>0,94650</b>	0,94586	0,92867
31	624	0,96875	<b>0,97790</b>	0,97771	0,97035

Fuente: Autor

### 3.5.5. Alineación para Weibull. Mínimo cuadrados.

Una vez que se obtuvo los datos de No Confiabilidad y de la Mantenibilidad, se procede a linealizar cada una de las distribuciones mediante el método de mínimos cuadrados.

Es así que en el Anexo 06, 07, 08, 09 Y 10 se muestra los diferentes cálculos realizados en Excel para linealizar la distribución de la No confiabilidad de las bombas P-1501A, P-1501B, P-1501C, P-1501D y P-1501E, respetivamente.

Los resultados de la Linealización de la No Confiabilidad de las bombas P-1501A, P-1501B, P-1501C, P-1501D y P-1501E se indican en las siguientes tablas:

**Tabla 3-12** Resultados de linealizar la distribución de No Confiabilidad de la bomba P-1501A.

RESULTADOS			
PENDIENTE (b)	1,372984136	Ajuste	0
INTERCEPTO (a)	-9,896487542		
		Se	0,270225897
		R <sup>2</sup>	0,945143689
		R	0,972185008

Fuente: Autor

**Tabla 3-13** Resultados de linealizar la distribución de No Confiabilidad de la bomba P-1501B.

RESULTADOS			
PENDIENTE (b)	1,46437	Ajuste	0
INTERCEPTO (a)	-10,71417		
		Se	0,13442
		R <sup>2</sup>	0,98679
		R	0,99337

Fuente: Autor

**Tabla 3-14** Resultados de linealizar la distribución de No Confiabilidad de la bomba P-1501C.

RESULTADOS			
PENDIENTE (b)	1,03353	Ajuste	0
INTERCEPTO (a)	-6,61782		
		Se	0,29651
		R <sup>2</sup>	0,93366
		R	0,96626

Fuente: Autor

**Tabla 3-15** Resultados de linealizar la distribución de No Confiabilidad de la bomba P-1501D.

RESULTADOS			
PENDIENTE (b)	0,80467	Ajuste	0
INTERCEPTO (a)	-5,57182		
		Se	0,40617
		R <sup>2</sup>	0,87476
		R	0,95329

Fuente: Autor

**Tabla 3-16** Resultados de linealizar la distribución de No Confiabilidad de la bomba P-1501E. .

RESULTADOS			
PENDIENTE (b)	0,92204	Ajuste	0
INTERCEPTO (a)	-6,58199		
		Se	0,13023
		R <sup>2</sup>	0,98758
		R	0,99377

**Fuente:** Autor

De igual forma para la Linealización de la Mantenibilidad de las bombas P-1501A, P-1501B, P-1501C, P-1501D y P-1501E se realizaron cálculos en Excel por el método de los mínimos cuadrados, estos se pueden verificar en los Anexos 11, 12, 13, 14 y 15 respetivamente.

**Tabla 3-17** Resultados de linealizar la distribución de Mantenibilidad de la bomba P-1501A.

RESULTADOS			
PENDIENTE (b)	0.66868	Ajuste	0
INTERCEPTO (a)	-2,08510		
		Se	0,33492
		R <sup>2</sup>	0,91787
		R	0,95805



**Tabla 3-18** Resultados de linealizar la distribución de Mantenibilidad de la bomba P-1501B.

RESULTADOS			
PENDIENTE (b)	0,70246	Ajuste	0
INTERCEPTO (a)	-1,70090		
		Se	0,35303
		R <sup>2</sup>	0,90858
		R	0,95319

Fuente: Autor

**Tabla 3-19** Resultados de linealizar la distribución de Mantenibilidad de la bomba P-1501C.

RESULTADOS			
PENDIENTE (b)	1,11814	Ajuste	0
INTERCEPTO (a)	-1,49272		
		Se	0,07480
		R <sup>2</sup>	0,98258
		R	0,99125

Fuente: Autor

**Tabla 3-20** Resultados de linealizar la distribución de No Confiabilidad de la bomba P-1501D.

RESULTADOS			
PENDIENTE (b)	0,71623	Ajuste	0
INTERCEPTO (a)	-1,18118		
		Se	0,12383
		R <sup>2</sup>	0,95443
		R	0,97695

Fuente: Autor

**Tabla 3-21** Resultados de linealizar la distribución de No Confiabilidad de la bomba P-1501E.

RESULTADOS			
PENDIENTE (b)	0,57335	Ajuste	0
INTERCEPTO (a)	-2,34099		
		Se	0,30459
		R <sup>2</sup>	0,93194
		R	0,96537

Fuente: Autor

### 3.5.6. Determinación de los parámetros de Weibull $\beta$ y $\eta$

### 3.5.6.1. Determinación de parámetros de Weibull para la Confiabilidad

A continuación se presentan las tablas de los parámetros de cada una de las bombas objeto de estudio:

**Tabla 3-22.** Parámetros de la confiabilidad de la bomba P-1501A.

Parámetros	Valores
Parámetro de forma beta $\beta$ = pendiente = b	1,372984136
Parámetro de escala $\eta$	1350,203812
MTBF (Tiempo medio entre fallas)	1234,510459

Fuente: Autor

**Tabla 3-23.** Parámetros de la confiabilidad de la bomba P-1501B.

Parámetros	Valores
Parámetro de forma beta $\beta$ = pendiente = b	1,464374861
Parámetro de escala $\eta$	1504,993714
MTBF	1362,78236

Fuente: Autor

**Tabla 3-24.** Parámetros de la confiabilidad de la bomba P-1501C.

Parámetros	Valores
Parámetro de forma beta $\beta$ = pendiente = b	0,995
Parámetro de escala $\eta$	670,235
MTBF	671,81

Fuente: Autor

**Tabla 3-25.** Parámetros de la confiabilidad de la bomba P-1501D.

Parámetros	Valores
Parámetro de forma beta $\beta$ = pendiente = b	0,789
Parámetro de escala $\eta$	104,894
MTBF	1197,31

Fuente: Autor

**Tabla 3-26.** Parámetros de la confiabilidad de la bomba P-1501E.

Parámetros	Valores
Parámetro de forma beta $\beta$ = pendiente = b	0,91
Parámetro de escala $\eta$	1287,514
MTBF	1346,81

Fuente: Autor

### 3.5.6.2. Determinación de parámetros de Weibull para la Mantenibilidad

Se presentan en tablas los parámetros de cada una de las bombas objeto de estudio.

Hay que aclarar que para la Mantenibilidad de las bombas P-1501B, P-1501C y P-1501D no cumplieron con la distribución de Weibull, ya que no se comprobaron las pruebas de bondad de ajuste con la distribución de Weibull, razón por la cual cumplieron con la distribución LogNormal.

**Tabla 3-27.** Parámetros de la Mantenibilidad de la bomba P-1501A.

Parámetros	Valores
Parámetro de forma beta $\beta$ = pendiente = b	0,66868
Parámetro de escala $\eta$	22,60625
MTTR (Tiempo medio entre reparaciones)	29,9563

Fuente: Autor

**Tabla 3-28.** Parámetros de la Mantenibilidad de la bomba P-1501B.

Parámetros	Valores
$\sigma$	1,679
$\mu$	1,7
MTTR	23,67

Fuente: Autor

**Tabla 3-29.** Parámetros de la Mantenibilidad de la bomba P-1501C.

Parámetros	Valores
$\sigma$	1,014
$\mu$	0,8
MTTR	3,66

Fuente: Autor

**Tabla 3-30.** Parámetros de la Mantenibilidad de la bomba P-1501D.

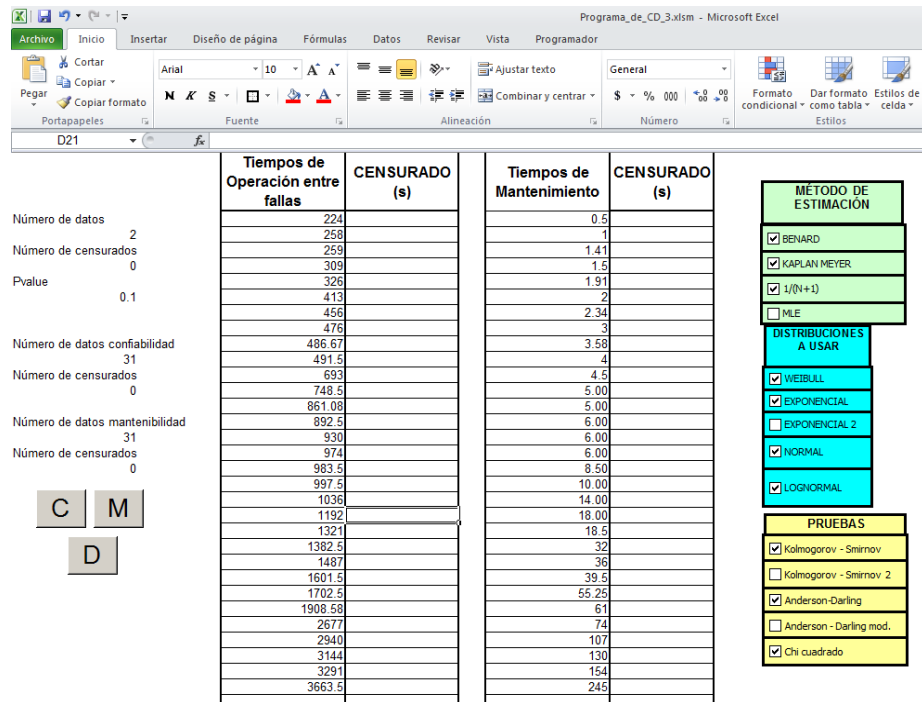
Parámetros	Valores
$\sigma$	1,785
$\mu$	1,2
MTTR	12,79

**Tabla 3-31.** Parámetros de la Mantenibilidad de la bomba P-1501E.

Parámetros	Valores
Parámetro de forma beta $\beta$ = pendiente = b	0,5735
Parámetro de escala $\eta$	59,32499
MTTR	94,9605

### 3.5.7. *Cumplimiento de las pruebas de bondad de ajuste*

Para las pruebas de bondad se utilizó una hoja de Excel o software RAM (Mora, 2007) que puede realizar los cálculos con los datos UT y DT, e indicando si cumplen o no las pruebas de bondad.

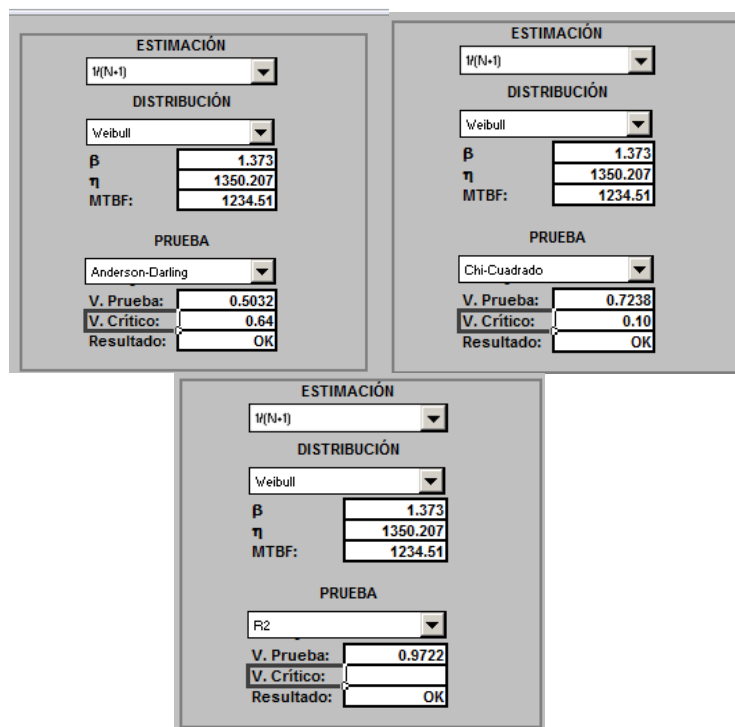
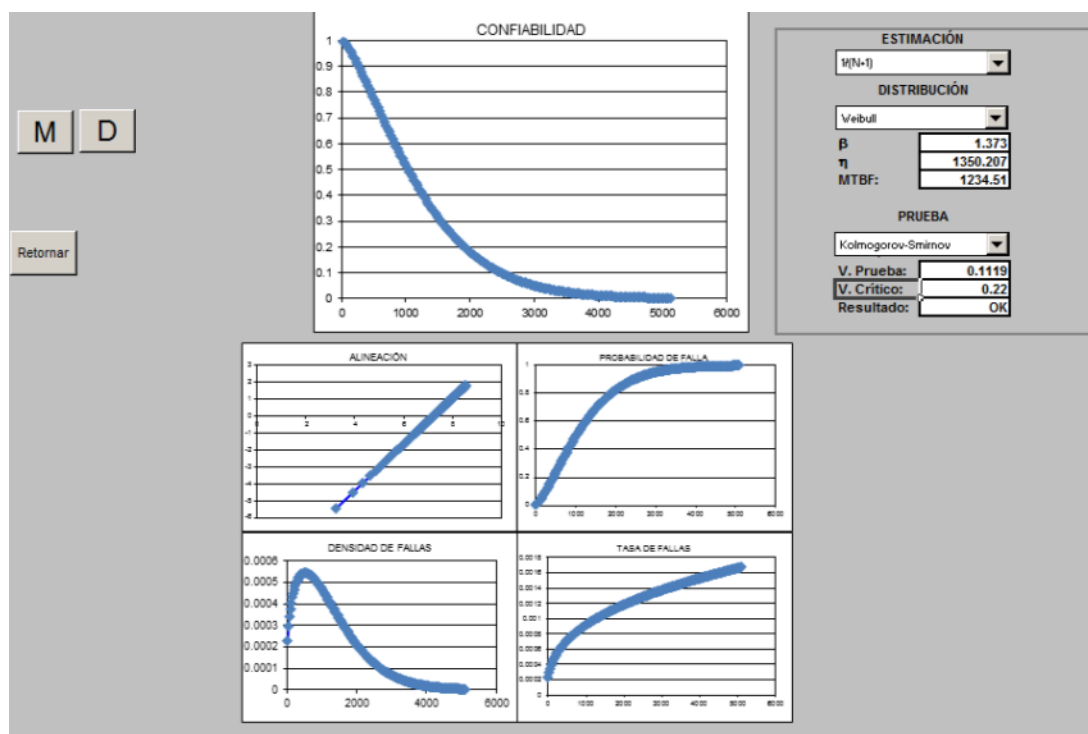


**Figura 3-1.** Programa - Cálculo de CMD, parámetros, curvas y bondad de ajuste, Plataforma de resultados.

**Fuente:** Ing. Luis Alberto Mora Gutiérrez

Una vez aplicados los cálculos de la hoja de Excel o software RAM (Mora. 2007), se obtienen los parámetros de la función junto con el cumplimiento o no de las funciones.

### 3.5.7.1. Cumplimiento de las pruebas de bondad de ajuste P-1501A



**Figura 0-2.** Resultados obtenidos para Confiabilidad de bomba P-1501A en software RAM (Mora 2007).

**Fuente:** Ing. Luis Alberto Mora Gutiérrez



Se observa que con el método de estimación del ikaésimo y para la distribución de Weibull se tienen los valores de  $\beta=1.373$ ,  $\eta=1350.207$  y  $MTBF=1234.51$ . Adicional cumplen con las tres pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, Chi-Cuadrado.

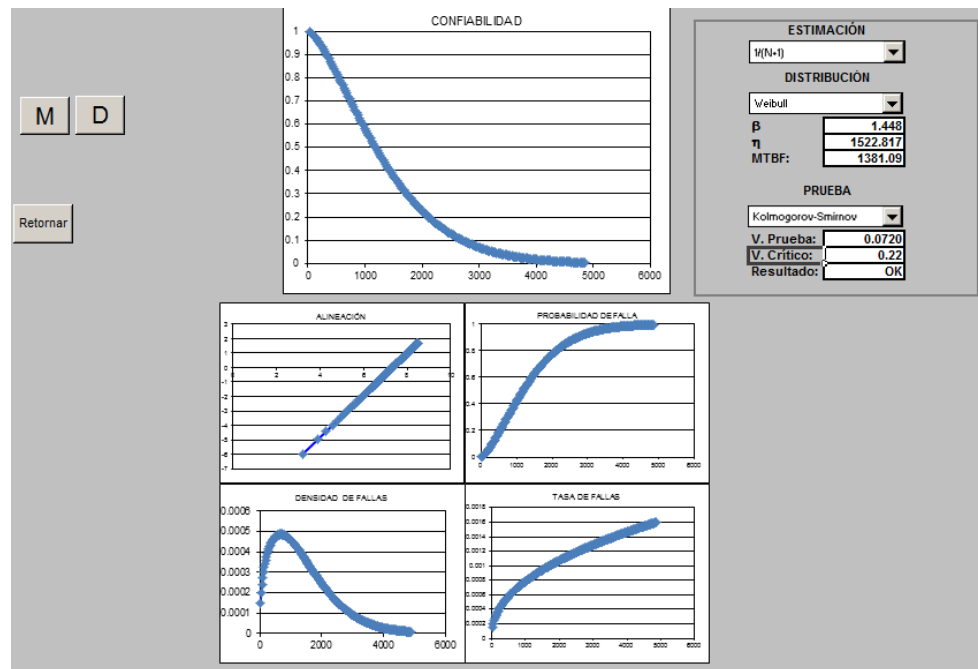
El software RAM de Mora 2007, ratifica la hipótesis de distribución estimada, así como los valores de sus parámetros.

**Tabla 3-32.** Parámetros de confiabilidad de bomba P-1501A, mediante software RAM (Mora 2007)

Parámetros	Valores
Parámetro de forma beta $\beta$ = pendiente = b	1,373
Parámetro de escala $\eta$	1350,2
MTBF	1234,51

Fuente: Autor

### 3.5.7.2. Cumplimiento de las pruebas de bondad de ajuste P-1501B



**Figura 0-3.** Resultados obtenidos para Confiabilidad de bomba P-1501B en software RAM (Mora 2007).

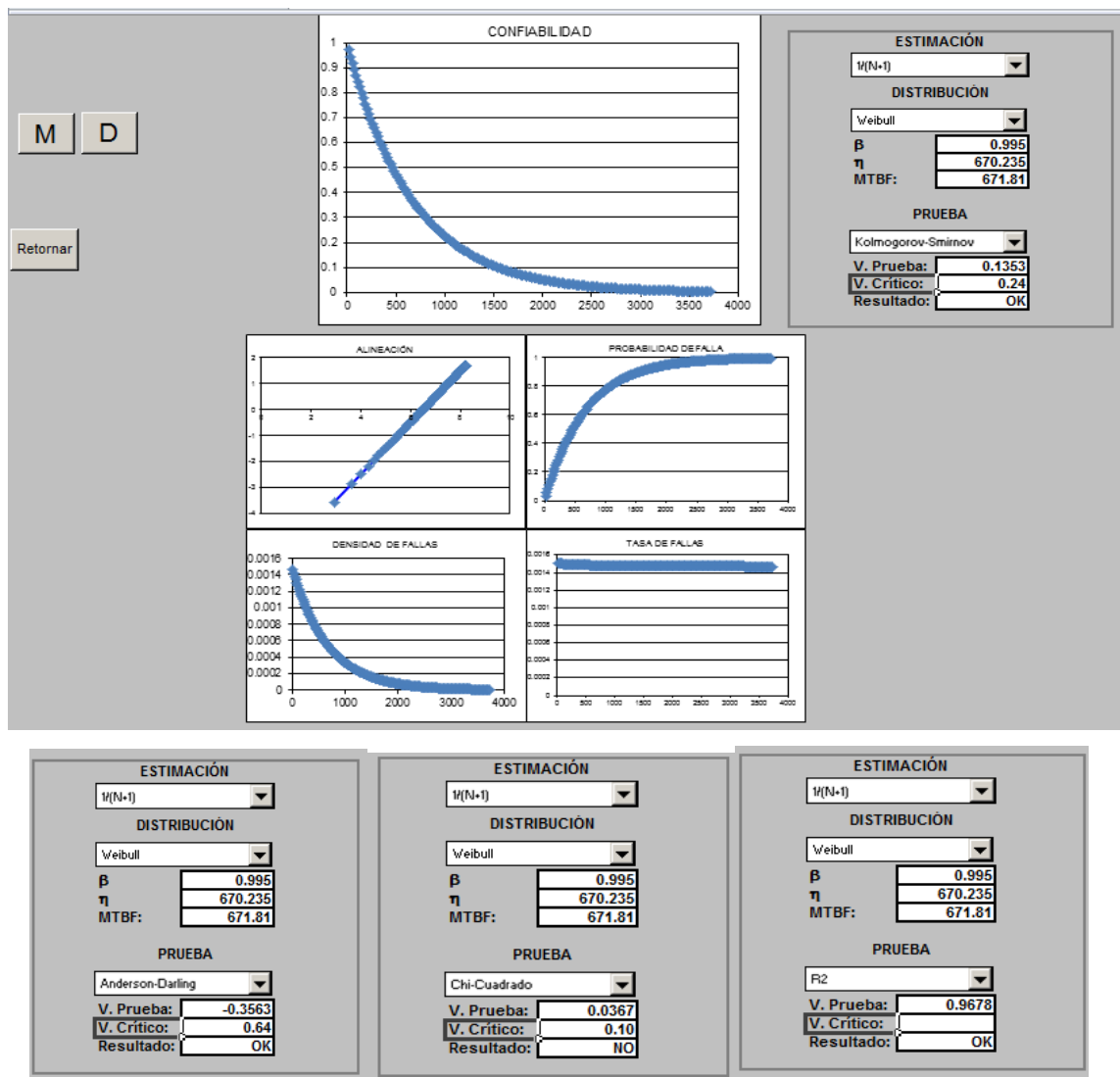
**Fuente:** Ing. Luis Alberto Mora Gutiérrez

Se observa que con el método de estimación del ikaésimo y para la distribución de Weibull se tienen los valores de  $\beta=1.448$ ,  $\eta=1522.817$  y  $MTBF=1381.09$ . Adicional cumplen con las tres pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, Chi-Cuadrado.

El software RAM (Mora 2007) ratifica la hipótesis de distribución estimada, así como los valores de sus parámetros.

### 3.5.7.3. Cumplimiento de las pruebas de bondad de ajuste P-1501C

Se observa que con el método de estimación del ikaésimo y para la distribución de Weibull se tienen los valores de  $\beta=0.995$ ,  $\eta=670.23$  y  $MTBF=671.81$ . Adicional cumplen con las tres pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, Chi-Cuadrado.

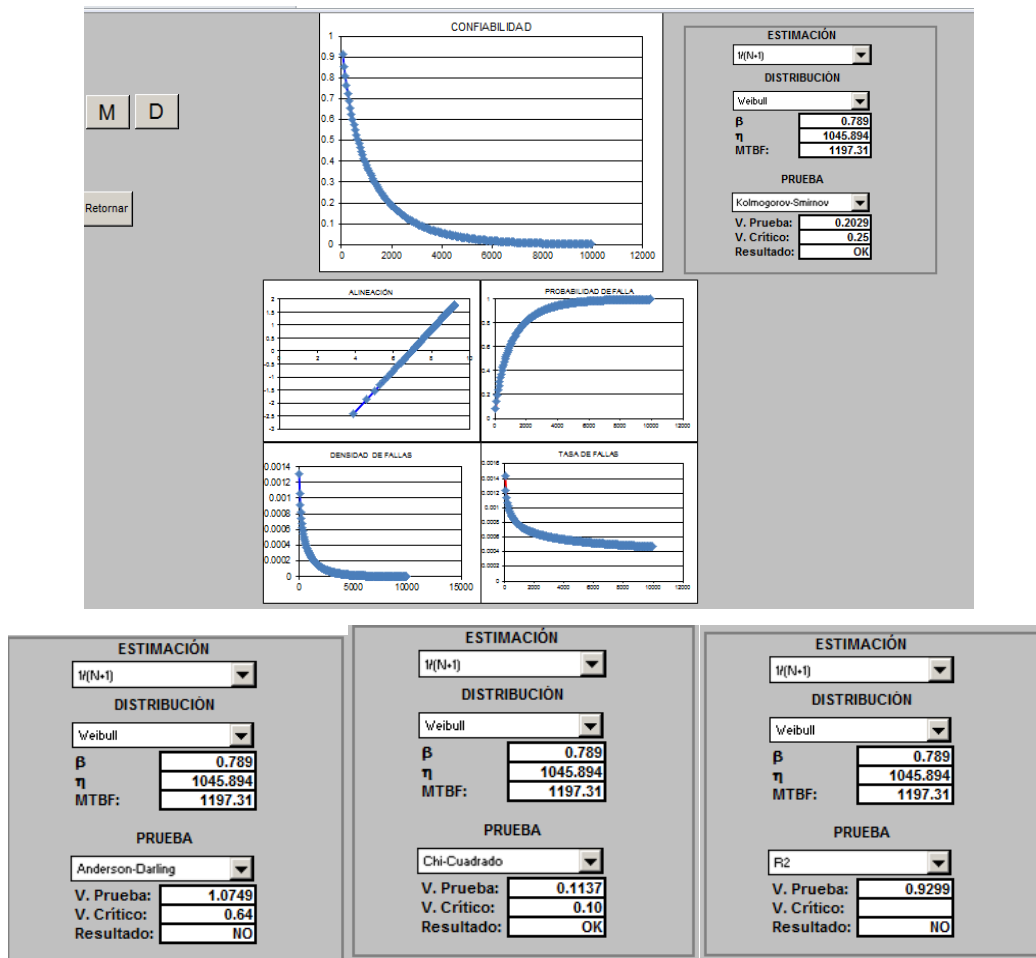


**Figura 0-4.** Resultados obtenidos para Confiabilidad de bomba P-1501C en software RAM (Mora 2007).

**Fuente:** Ing. Luis Alberto Mora Gutiérrez

El software RAM (Mora 2007) ratifica la hipótesis de distribución estimada, así como los valores de sus parámetros.

### 3.5.7.4. Cumplimiento de las pruebas de bondad de ajuste P-1501D



**Figura 0-5.** Resultados obtenidos para Confiabilidad de bomba P-1501D en software RAM (Mora 2007).

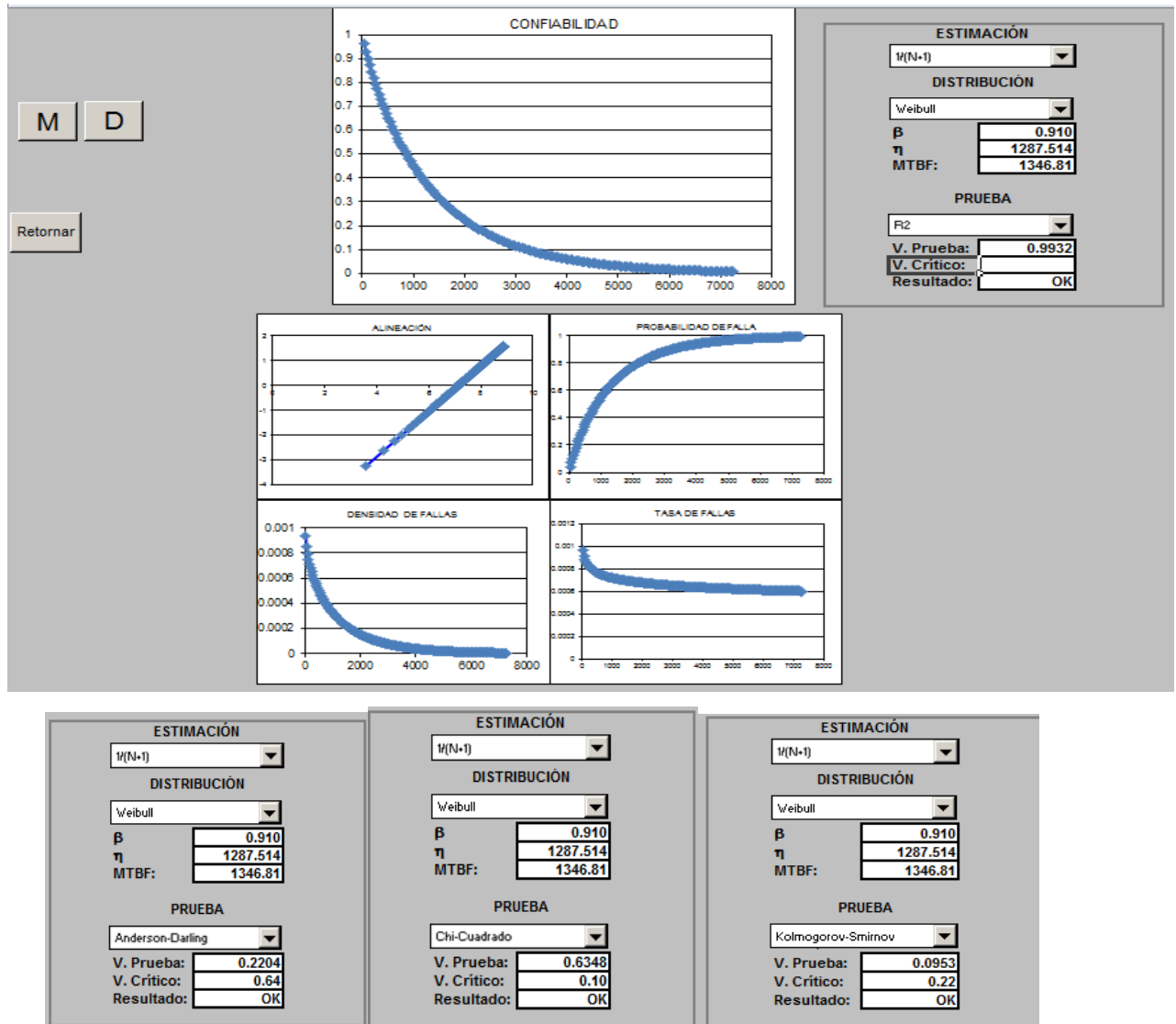
**Fuente:** Ing. Luis Alberto Mora Gutiérrez

Con el software RAM (Mora 2007) y utilizando el método de estimación del  $i$ -ésimo y para la distribución de Weibull se tienen los valores de  $\beta=0.789$ ,  $\eta=1045.894$  y MTBF=1197.31. Adicional cumplen con las tres pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, Chi-Cuadrado.

El software ratifica la hipótesis de distribución estimada, así como los valores de sus parámetros.

Se observa que con el método de estimación del ikaésimo y para la distribución de Weibull se tienen los valores de  $\beta=0.910$ ,  $\eta=1287.514$  y  $MTBF=1346.81$ . Adicional cumplen con las tres pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, Chi-Cuadrado.

### 3.5.7.5. Cumplimiento de las pruebas de bondad de ajuste P-1501E



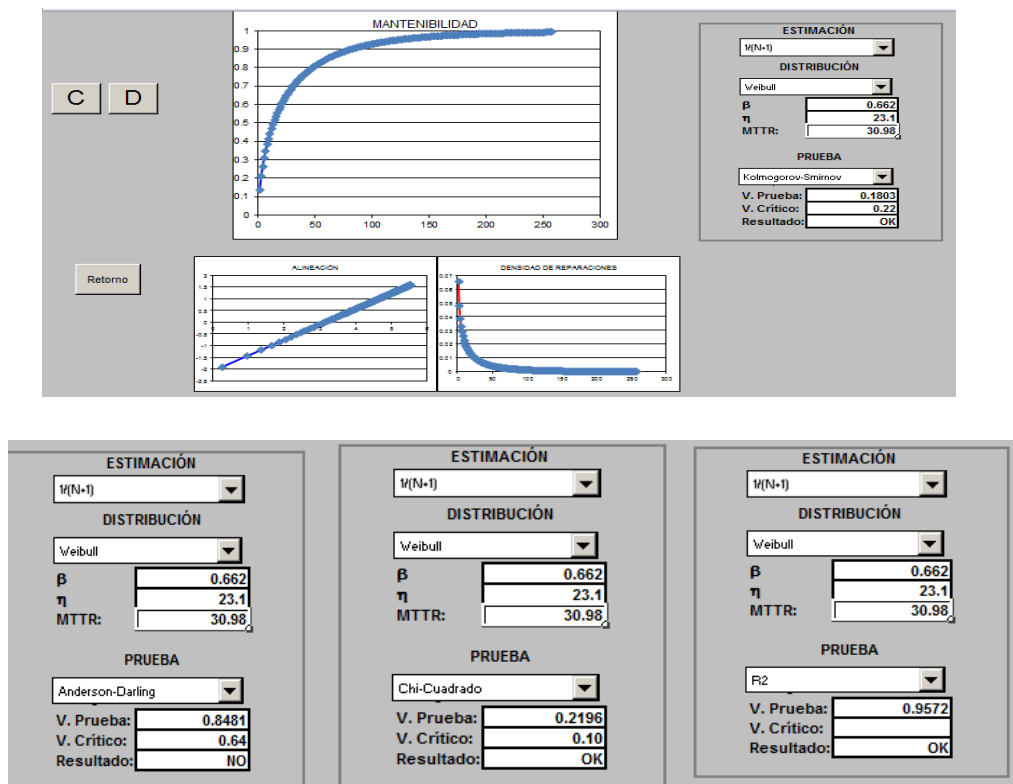
**Figura 3-6.** Resultados obtenidos para Confiabilidad de bomba P-1501E en software RAM (Mora 2007).

**Fuente:** Ing. Luis Alberto Mora Gutiérrez

El software RAM (Mora 2007) ratifica la hipótesis de distribución estimada para la bomba P-1501E, así como los valores de sus parámetros.

### 3.5.7.6. Cumplimiento de las pruebas de bondad de ajuste mantenibilidad P-1501A

Para la mantenibilidad se realiza el mismo procedimiento de comprobación de las distribuciones de Weibull. Es necesario aclarar que tanto para las bombas P-1501B, C y D no se cumplieron las pruebas de bondad de ajuste con la distribución Weibull; es así que se realizaron las pruebas con la distribución Log Normal, donde si cumplieron dichas pruebas de bondad de ajuste. A continuación los resultados de las pruebas de bondad de ajuste para la Mantenibilidad de las bombas del sistema de reinyección de agua:



**Figura 3-7.** Resultados obtenidos para Mantenibilidad de bomba P-1501A en software RAM (Mora 2007).

**Fuente:** Ing. Luis Alberto Mora Gutiérrez

Se observa que con el método de estimación del ikaésimo y para la distribución de Weibull se tienen los valores de  $\beta=0.662$ ,  $\eta=23.1$  y  $MTTR=30.98$ . Adicional cumplen con dos pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov, y, Chi-Cuadrado.

El software ratifica la hipótesis de distribución estimada, así como los valores de sus parámetros, existe una pequeña variación de valores entre los calculados y los que presento la hoja de cálculo de Mora 2007, para  $\beta$  existe una variación del 1%,  $\eta$  del 2% y para el  $MTTR$  del 3.3%.

### 3.5.7.7. Cumplimiento de las pruebas de bondad de ajuste mantenibilidad P-1501B

Para la mantenibilidad de la bomba P-1501B se utilizó los datos del Anexo 03 y las ecuaciones que manifiesta Mora (2007) para la mantenibilidad. De igual forma se siguió el método ikaésimo y que la función era Weibull, sin embargo las pruebas de bondad de ajuste del software RAM de Mora (2007) indican que no cumple la función de Weibull, ya que las pruebas de bondad no fueron aceptadas por lo menos en dos. La segunda opción que nos sugiere Mora (2007), es la función LogNormal. Según Mora, los tiempos de reparación de componentes se ajustan bien al modelo de distribución LogNormal. Es así que se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 34 y que si cumplen 2 o más pruebas de bondad de ajuste.

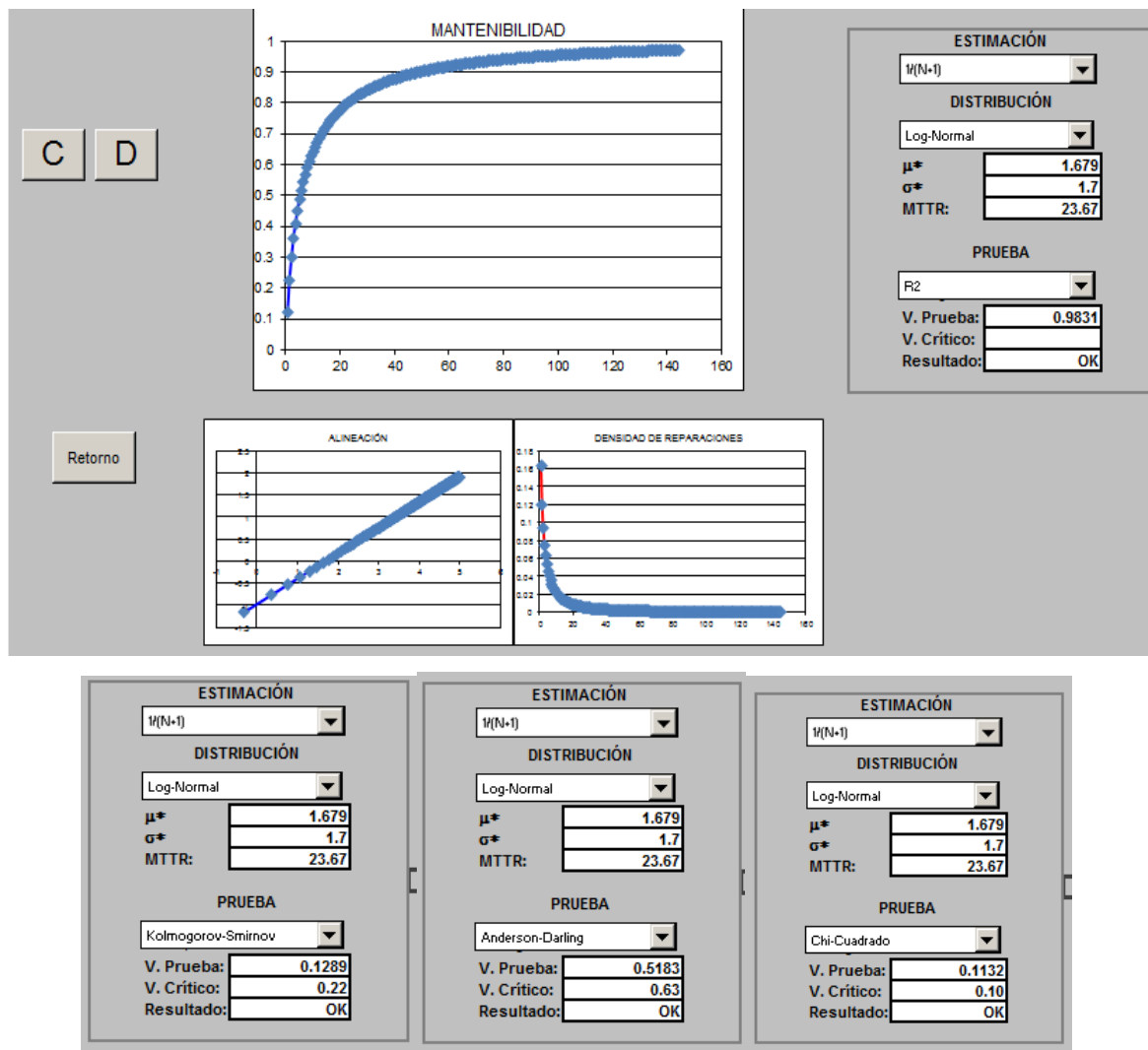
**Tabla 3-33.** Resultados de mantenibilidad para la bomba P-1501B, nótese que la función sigue la función LogNormal.

Parámetros	Valores
$\sigma$	0,66868
$\mu$	22,60625
MTTR	59,9563

Fuente: Autor

En la Figura 16 se observa que con el método de estimación del ikaésimo y para la distribución de LogNormal se tienen los valores de  $\mu=1.679$ ,  $\sigma=1.7$  y  $MTTR=23.67$ . Adicional cumplen con las tres pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, Chi-Cuadrado.

El software RAM ratifica la hipótesis de distribución estimada, así como los valores de sus parámetros.



**Figura 3-8.** Resultados obtenidos para Mantenibilidad de bomba P-1501B en software RAM (Mora 2007).

**Fuente:** Ing. Luis Alberto Mora Gutiérrez



### 3.5.7.8. Cumplimiento de las pruebas de bondad de ajuste mantenibilidad P-1501C

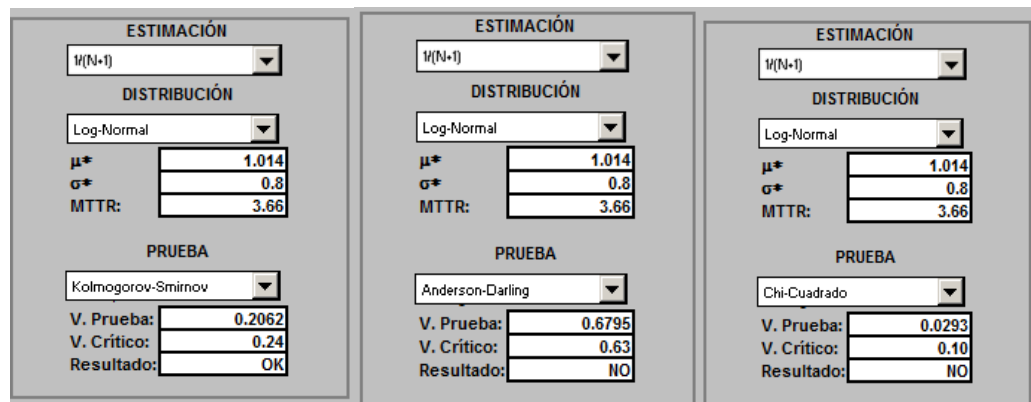
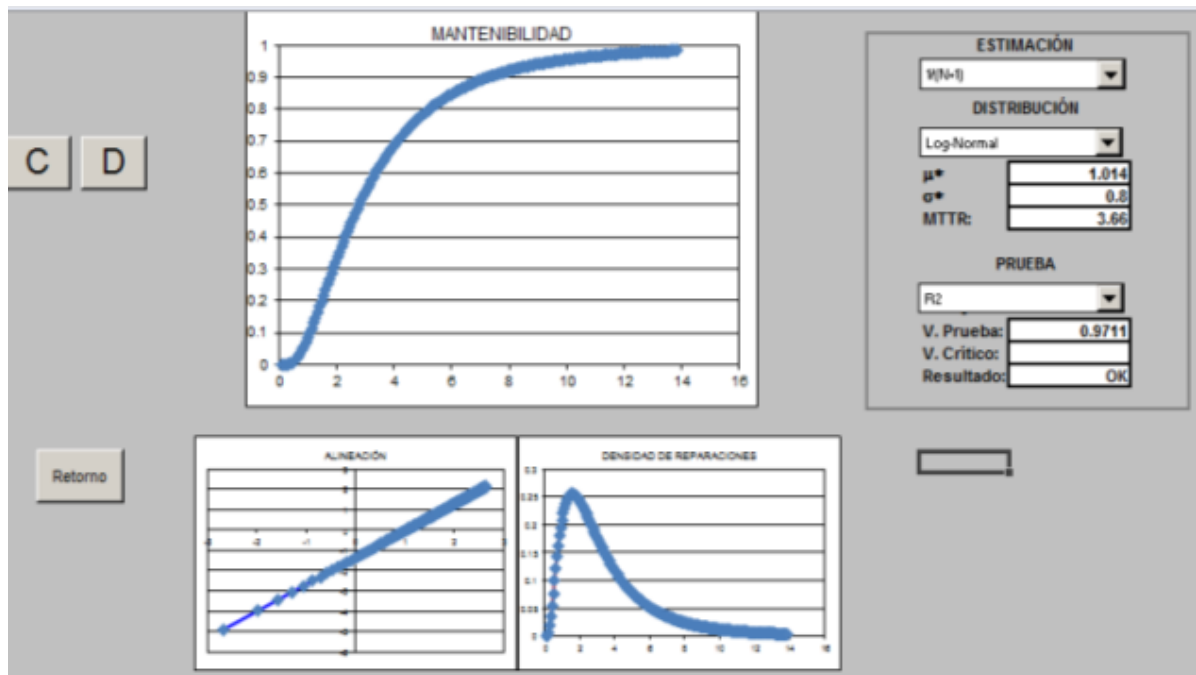
Para la mantenibilidad de la bomba P-1501C se utilizó los DT de la base de datos del Anexo 04 y las ecuaciones para la mantenibilidad que manifiesta Mora (2007). De igual manera se siguió el método ikaésimo y se asume que cumple la función de Weibull. Sin embargo al aplicar el software RAM (Mora 2007) se verifica que los datos no cumple la función de Weibull, ya que las pruebas de bondad no fueron aceptadas por lo menos en dos. La segunda opción que nos sugiere Mora 2007, es la función LogNormal. Según Mora (2007), los tiempos de reparación de componentes se ajustan bien al modelo de distribución. Se verifica que para la función LogNormal si cumple con las pruebas de bondad de ajuste, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 35.

**Tabla 3-34.** Resultados de mantenibilidad para la bomba P-1501C, nótese que la función sigue la función LogNormal.

Parámetros	Valores
$\sigma$	1,014
$\mu$	0,8
MTTR	3,66

Fuente: Autor

Se observa que con el método de estimación del ikaésimo y para la distribución de LogNormal se tienen los valores de  $\mu=1.014$ ,  $\sigma=0.8$  y  $MTTR=3.66$ . Adicional cumplen con dos pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov, y Chi-Cuadrado.



**Figura 3-9.** Resultados obtenidos para Mantenibilidad de bomba P-1501C en software RAM (Mora 2007).

**Fuente:** Ing. Luis Alberto Mora Gutiérrez

El software ratifica la hipótesis de distribución estimada, así como los valores de sus parámetros.

### 3.5.7.9. Cumplimiento de las pruebas de bondad de ajuste mantenibilidad P-1501D

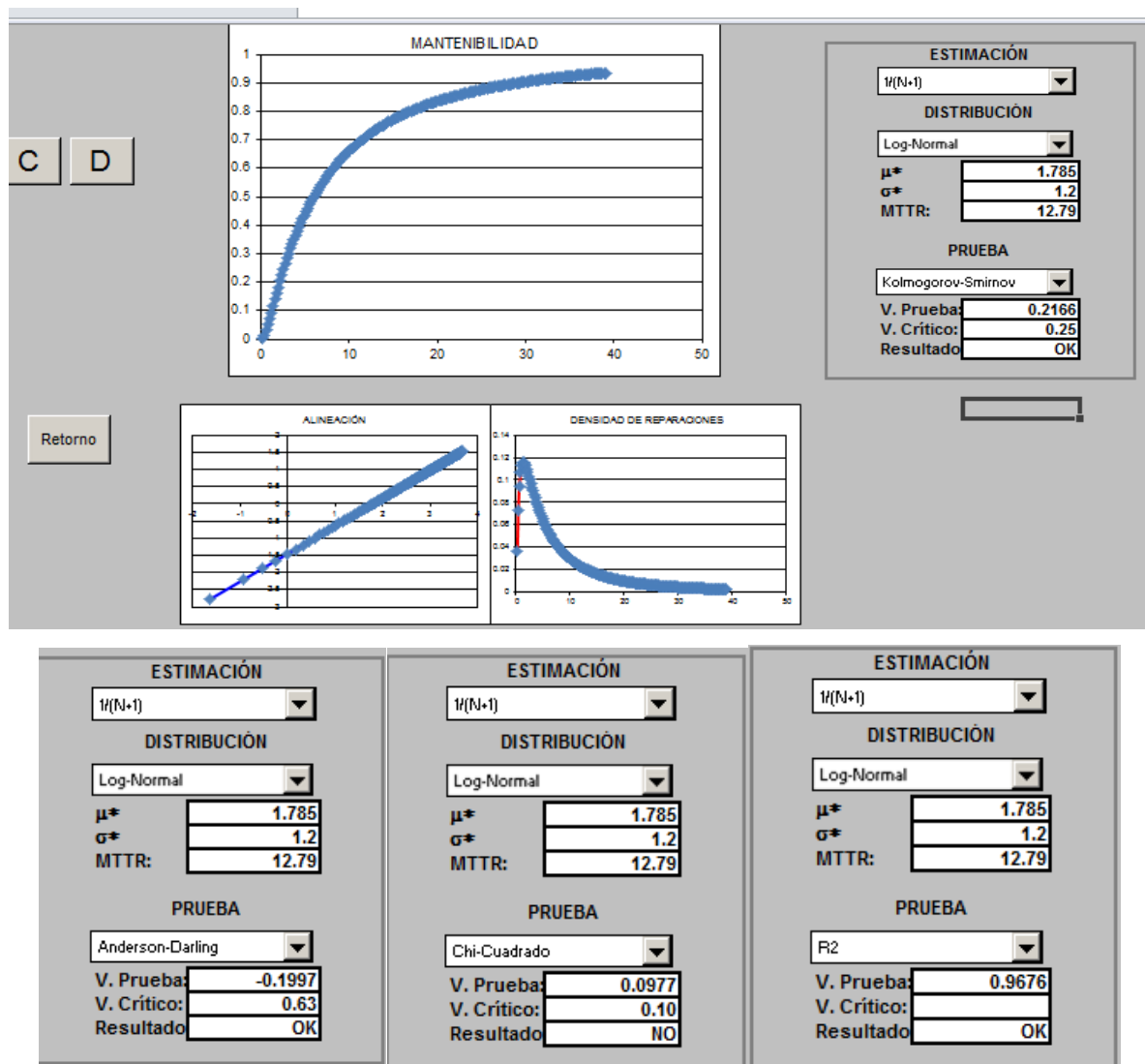
Para la mantenibilidad de la bomba P-1501D se utilizó la base datos del Anexo 05, se siguió la metodología de la Figura 2 y las ecuaciones de la mantenibilidad que sugiere Mora (2007). Se verifica que la función de mantenibilidad no cumple Weibull ya que las pruebas de bondad de ajuste no fueron aceptadas en dos o más. Con la distribución LogNormal el software RAM ratifica las pruebas de bondad de ajuste con un coeficiente de asociación entre puntos  $R^2$  de 0.96 por lo que se acepta la distribución del software RAM con los resultados mostrados en la Tabla 36.

**Tabla 3-35.** Resultados de mantenibilidad para la bomba P-1501D, nótese que la función sigue la función LogNormal.

Parámetros	Valores
$\sigma$	1,789
$\mu$	1,2
MTTR	12,79

Fuente: Autor

Se observa que con el método de estimación del ikaésimo y para la distribución de LogNormal se tienen los valores de  $\mu=1.789$ ,  $\sigma=1.2$  y  $MTTR=12.79$ . Adicional cumplen con las tres pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling. El software ratifica la hipótesis de distribución estimada, así como los valores de sus parámetros.



**Figura 3-10.** Resultados obtenidos para Mantenibilidad de bomba P-1501D en software RAM (Mora 2007).

**Fuente:** Ing. Luis Alberto Mora Gutiérrez

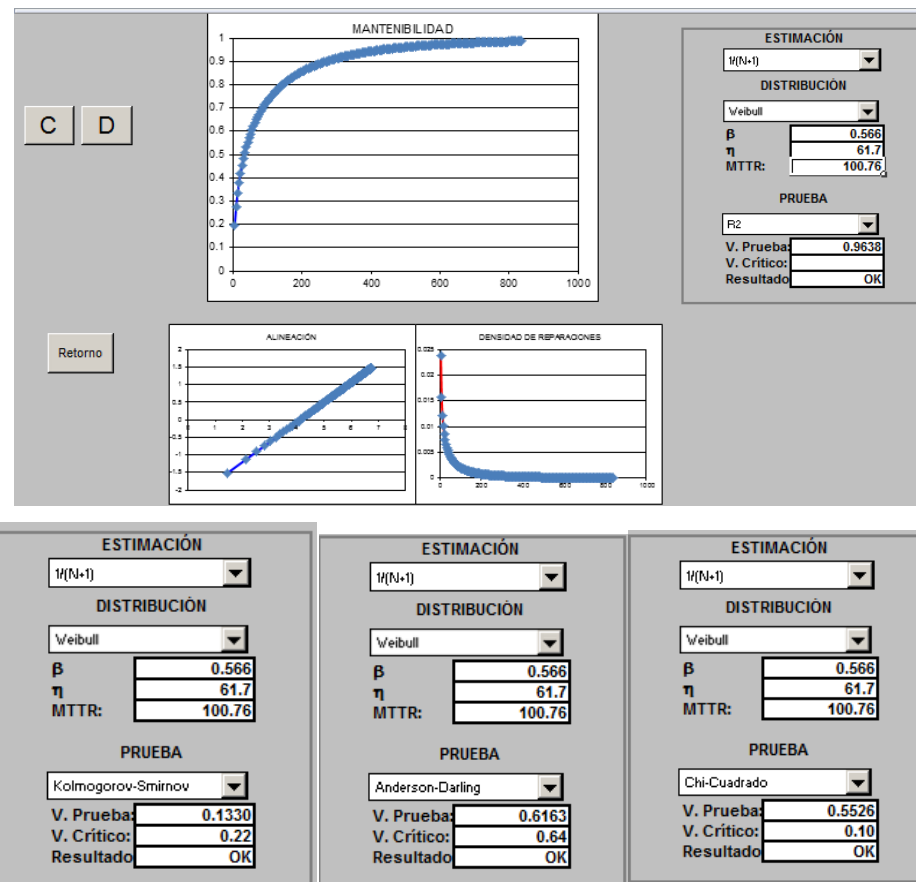
#### 1.7.1.1 Cumplimiento de las pruebas de bondad de ajuste mantenibilidad P-1501E

Para la mantenibilidad de la bomba P-1501E se utilizó la base datos del Anexo 06, se siguió la metodología de la Figura 2 y las ecuaciones de la mantenibilidad que sugiere Mora (2007). Se verifica que la función de mantenibilidad si cumple Weibull ya que las pruebas de bondad de ajuste

fue aceptada en dos o más. Los resultados obtenidos en Excel se muestran en la Tabla 37, estos ratifican las pruebas de bondad de ajuste con un coeficiente de asociación entre puntos  $R^2$  de 0.96

**Tabla 0-36.** Resultados de mantenibilidad software RAM para la bomba P-1501E, nótese que la función sigue la función Weibull

Parámetros	Valores
$\beta$	0,566
$\eta$	61.7
MTTR	100.76



**Figura 3-11.** Resultados obtenidos para Mantenibilidad de bomba P-1501E en software RAM (Mora 2007).

**Fuente:** Ing. Luis Alberto Mora Gutiérrez

Se observa que con el método de estimación del ikaésimo y para la distribución de Weibull se tienen los valores de  $\beta=0.566$ ,  $\eta=61.7$  y  $MTTR=100.76$ . Adicional cumplen con las tres pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling.

El software ratifica la hipótesis de distribución estimada, así como los valores de sus parámetros, existe una pequeña variación de valores entre los calculados y los que presento el software RAM (hoja de cálculo de Excel) (Mora 2007), para  $\beta$  existe una variación del 1.57%,  $\eta$  del 3.93% y para el MTTR del 5.9%.

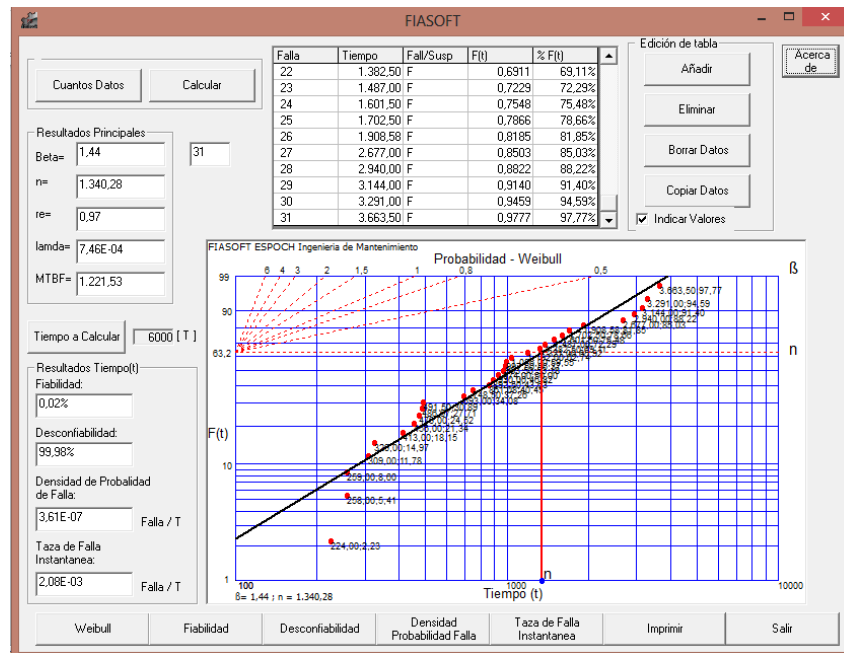
### **3.6. Determinación de la confiabilidad mediante FIASOFT.**

Para determinar las curvas de confiabilidad y mantenibilidad de las bombas del sistema de reinyección de agua se utilizó el software FIASOFT.

El software FIASOFT fue desarrollado en la ESPOCH como proyecto de tesis de graduación para ingeniería de mantenimiento. A continuación se presentan las capturas de pantalla de la simulación del software y sus diferentes curvas de confiabilidad y mantenibilidad

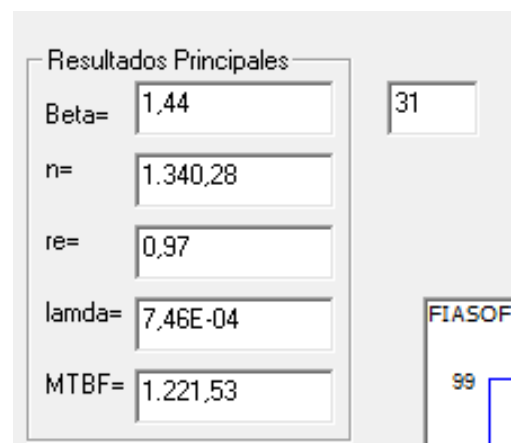
Se realiza la comparación de los datos del software FIASOFT con los obtenidos mediante cálculos en Excel y los datos obtenidos en el software RAM de Mora, se comprueban los resultados.

### 3.6.1. Resultados de confiabilidad de bomba P-1501A mediante FIASOFT



**Figura 3-12.** Resultados de la confiabilidad de la bomba P-1501A. **Fuente:** Software FIASOFT

En el Anexo 16 se puede observar tabulada la función  $F(t)$  a los diferentes tiempos alimentados en la base de datos y según el número de fallas.

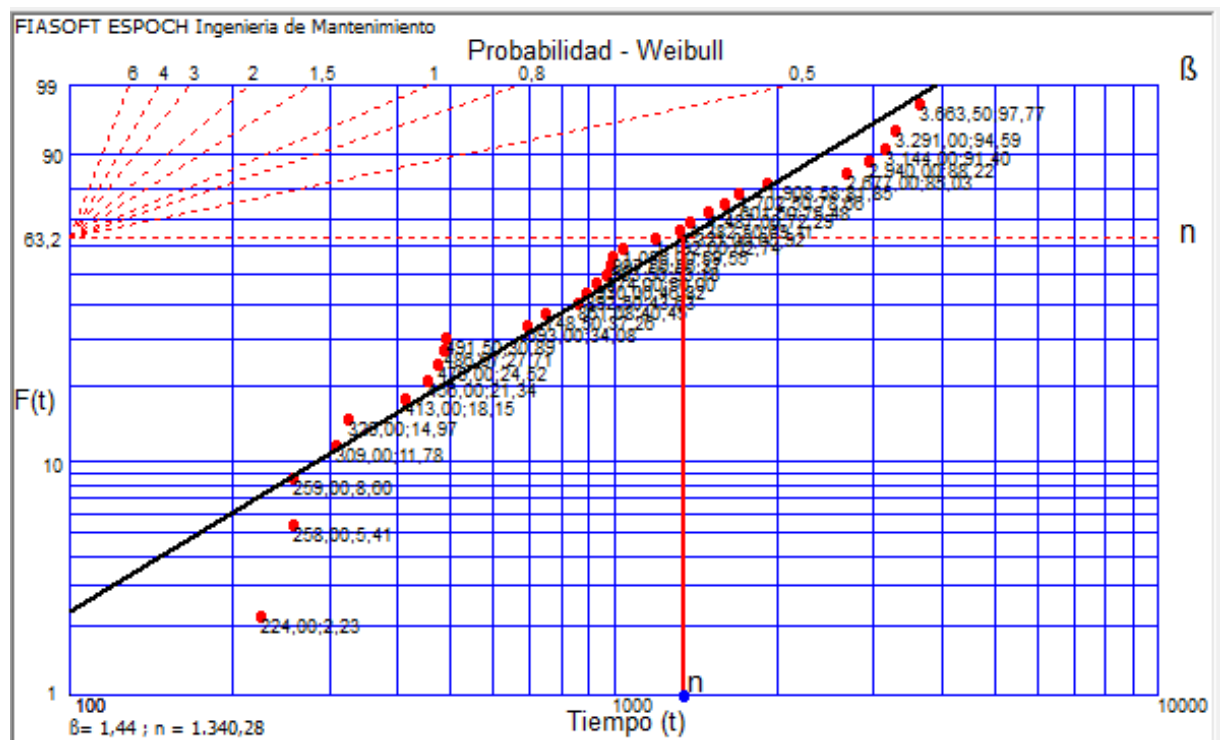


**Figura 3-13.** Resultados de la confiabilidad de la bomba P-1501A.

**Fuente:** Software FIASOFT

Comparados con los parámetros obtenidos de forma manual y corroborados con el software de Mora 2007 (hoja de Excel) se tienen resultados casi exactos con una desviación del 5.1% para el parámetro  $\beta$ , 0,73% para el parámetro de escala  $\eta$  y 1% para el MTBF.

Se concluye que los parámetros obtenidos por forma manual, con software de Mora 2007 y FIASOFT son los que mantiene la bomba P-1501A para las condiciones actuales.

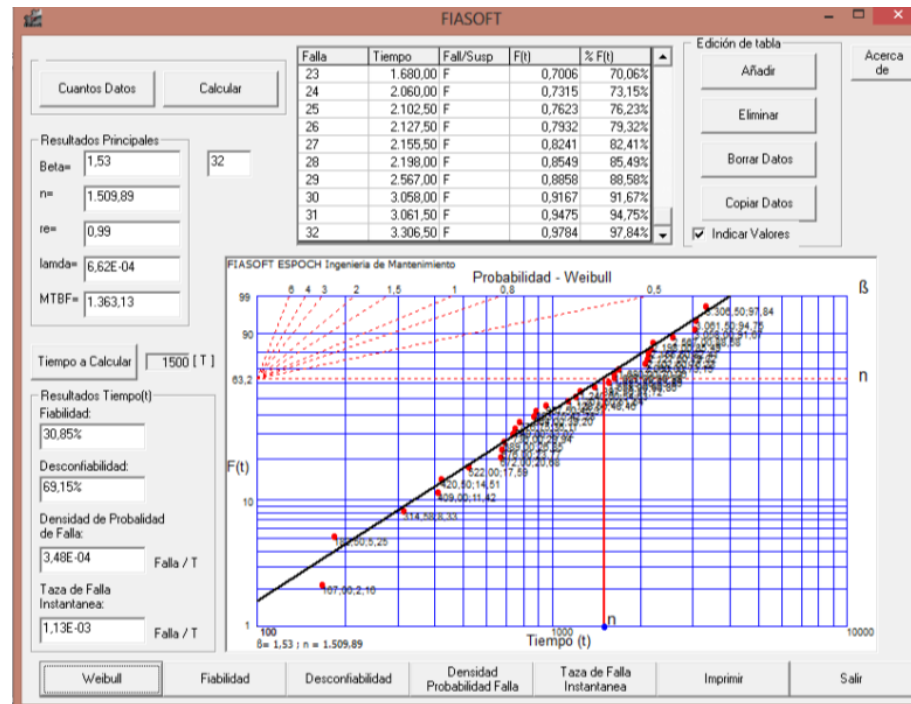


**Figura 3-14.** Probabilidad de Weibull ( $\beta$  y  $\eta$ ) de bomba P-1501A.

Fuente FIASOFT-Autor



### 3.6.2. Resultados de confiabilidad de bomba P-1501B mediante FIASOFT

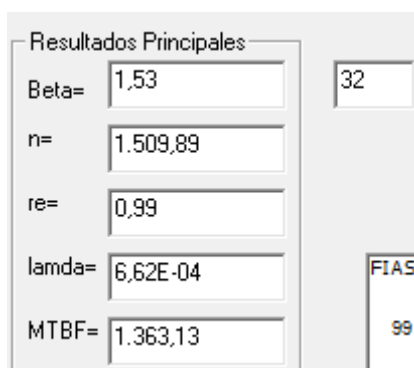


**Figura 3-15.** Resultados de la confiabilidad de la bomba P-1501B.

**Fuente:** Software FIASOFT

En el Anexo 17 se puede observar tabulada la función  $F(t)$  a los diferentes tiempos alimentados en la base de datos y según el número de fallas.

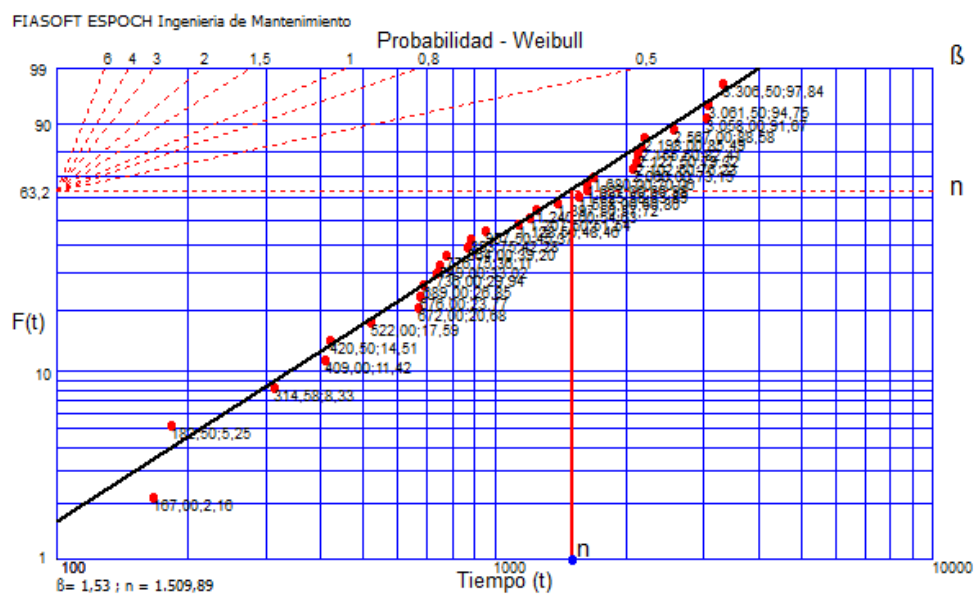
Los parámetros de fiabilidad obtenidos con FIASOFT comparados con los parámetros obtenidos de forma manual y corroborados con el software RAM (Mora 2007) se tienen resultados casi exactos con una desviación del 4.3% para el parámetro  $\beta$ , 0,3% para el parámetro de escala  $\eta$  y 0,02% para el MTBF.



**Figura 0-16.** Resultados de la confiabilidad de la bomba P-1501B,

**Fuente:** Autor-FIASOFT

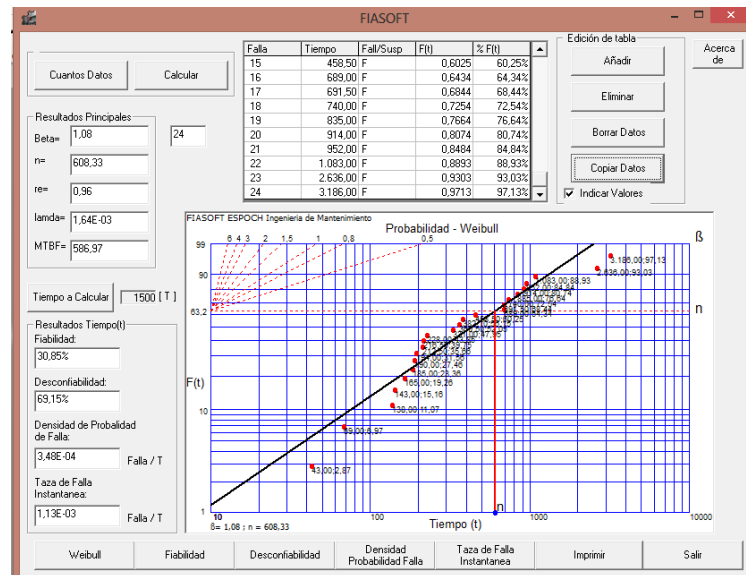
Se concluye que los parámetros obtenidos por forma manual, con software RAM y FIASOFT son los que mantiene la bomba P-1501B para las condiciones actuales.



**Figura 0-17.** Probabilidad de Weibull ( $\beta$  y  $\eta$ ) de bomba P-1501B.

**Fuente:** FIASOFT-Autor

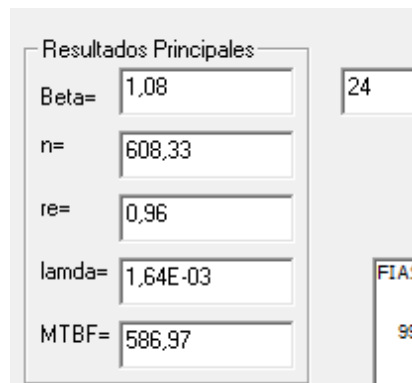
### 3.6.3. Resultados de confiabilidad de bomba P-1501C mediante FIASOFT



**Figura 3-18.** Resultados de la confiabilidad de la bomba P-1501C.

**Fuente:** Autor-FIASOFT

En el Anexo 18 se puede observar tabulada la función  $F(t)$  a los diferentes tiempos alimentados en la base de datos y según el número de fallas.



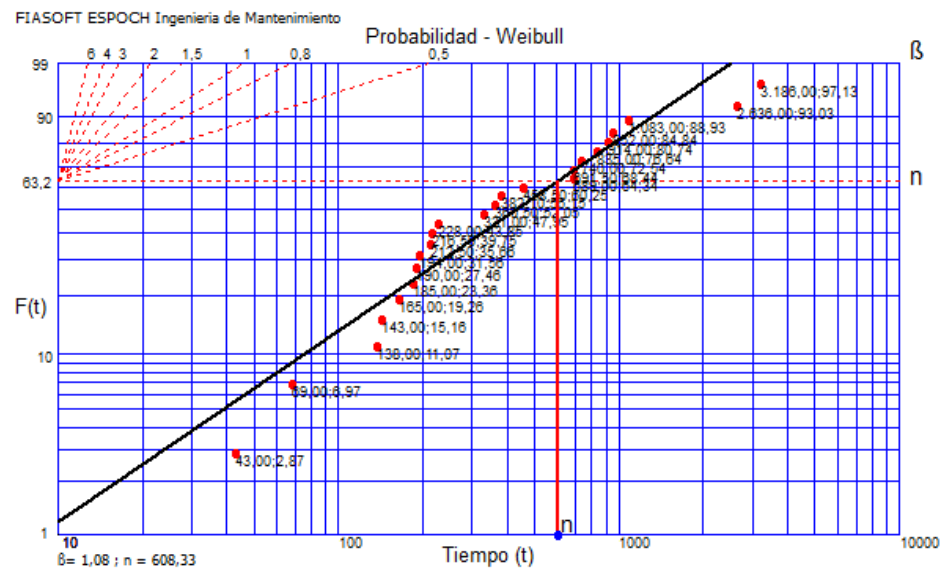
**Figura 3-19.** Resultados de la confiabilidad de la bomba P-1501C,

**Fuente:** Autor-FIASOFT

Los parámetros obtenidos mediante FIASOFT comparados con los parámetros obtenidos de forma manual y corroborados con el software RAM (Mora 2007) se tienen resultados casi exactos con una desviación del 4.62% para el parámetro  $\beta$ , 0,75% para el parámetro de escala  $\eta$  y 1,46% para el MTBF.

Se concluye que los parámetros obtenidos por forma manual, con software de Mora 2007 y FIASOFT son los que mantiene la bomba P-1501C para las condiciones actuales.

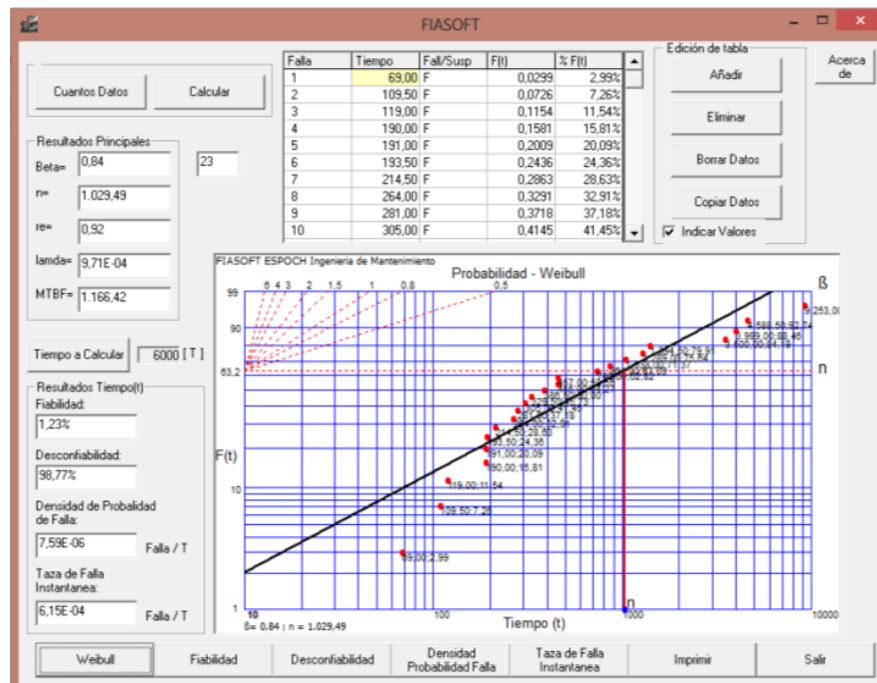
Cabe indicar que para el software de Mora se tuvo que censurar dos datos (9 y 16 de la serie UT) para que no existiera error en el mismo, mientras que en FIASOFT y manualmente no se tuvo necesidad.



**Figura 3-20.** Probabilidad de Weibull ( $\beta$  y  $\eta$ ) de bomba P-1501C.

**Fuente:** Autor-FIASOFT

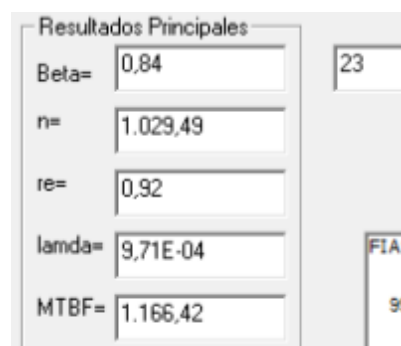
### 3.6.4. Resultados de confiabilidad de bomba P-1501D mediante FIASOFT



**Figura 3-21.** Resultados de la confiabilidad de la bomba P-1501D.

**Fuente:** Autor-FIASOFT

En el Anexo 19 se puede observar tabulada la función  $F(t)$  a los diferentes tiempos alimentados en la base de datos y según el número de fallas con la ayuda de FIASOFT.

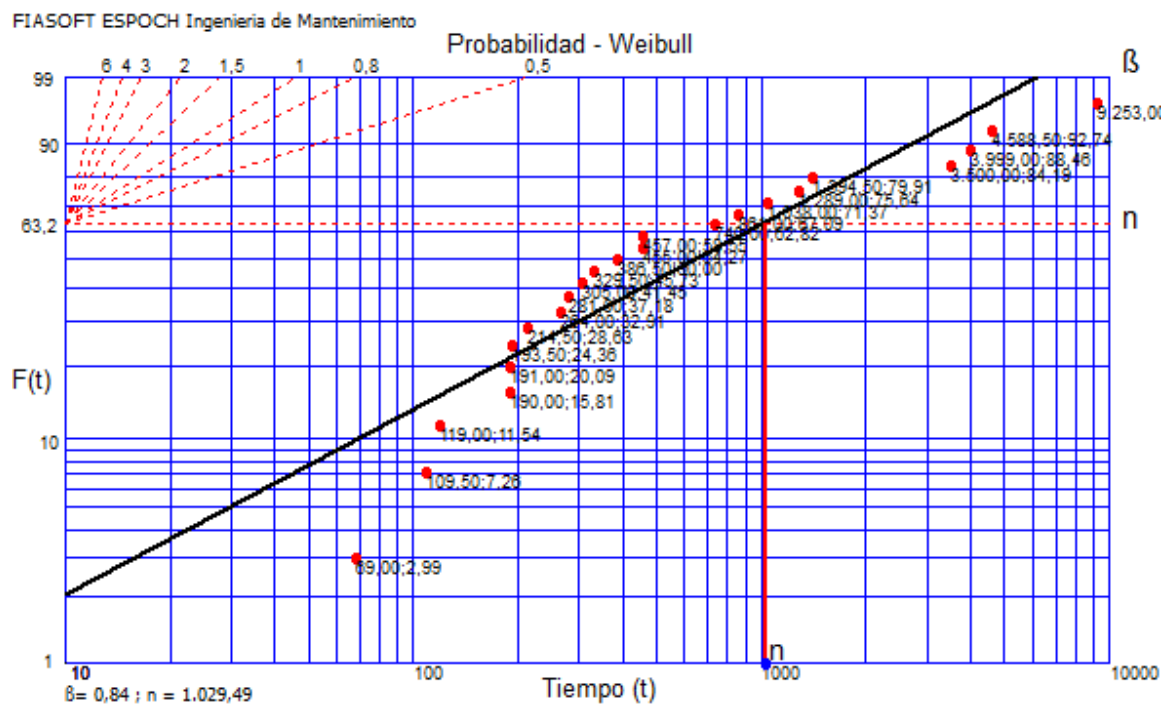


**Figura 3-22.** Resultados de la confiabilidad de la bomba P-1501D,

**Fuente:** Autor-FIASOFT

Los resultados obtenidos mediante FIASOFT y comparados con los parámetros obtenidos de forma manual y corroborados con el software RAM (Mora 2007) se tienen resultados casi exactos con una desviación del 4.2% para el parámetro  $\beta$ , 1.23% para el parámetro de escala  $\eta$  y 1,64% para el MTBF.

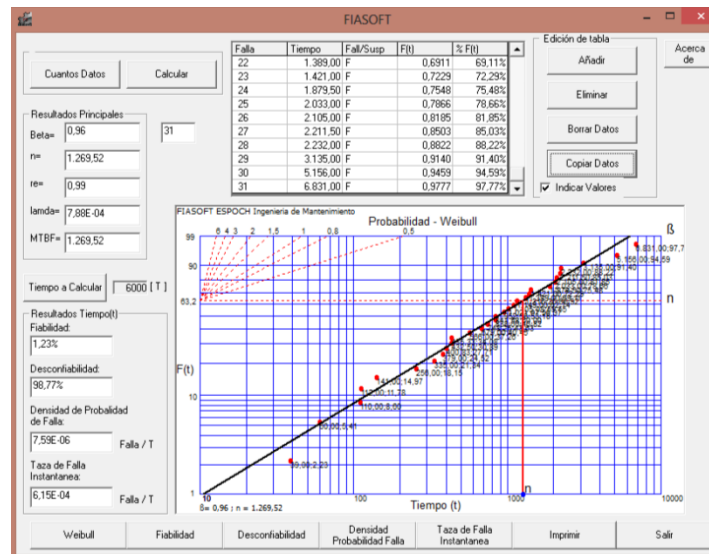
Se concluye que los parámetros obtenidos por forma manual, con software de Mora 2007 y FIASOFT son los que mantiene la bomba P-1501D para las condiciones actuales.



**Figura 3-23.** Probabilidad de Weibull ( $\beta$  y  $\eta$ ) de bomba P-1501D.

Fuente FIASOFT-Autor

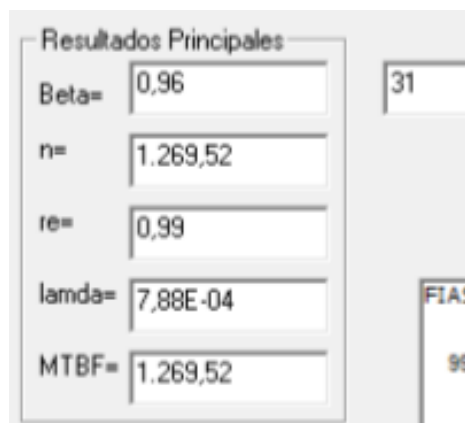
### 3.6.5. Resultados de confiabilidad de bomba P-1501E mediante FIASOFT



**Figura 3-24.** Resultados de la confiabilidad de la bomba P-1501E.

**Fuente:** Autor-FIASOFT

En el Anexo 20 se puede observar tabulada la función  $F(t)$  a los diferentes tiempos alimentados en la base de datos y según el número de fallas con la ayuda de FIASOFT.

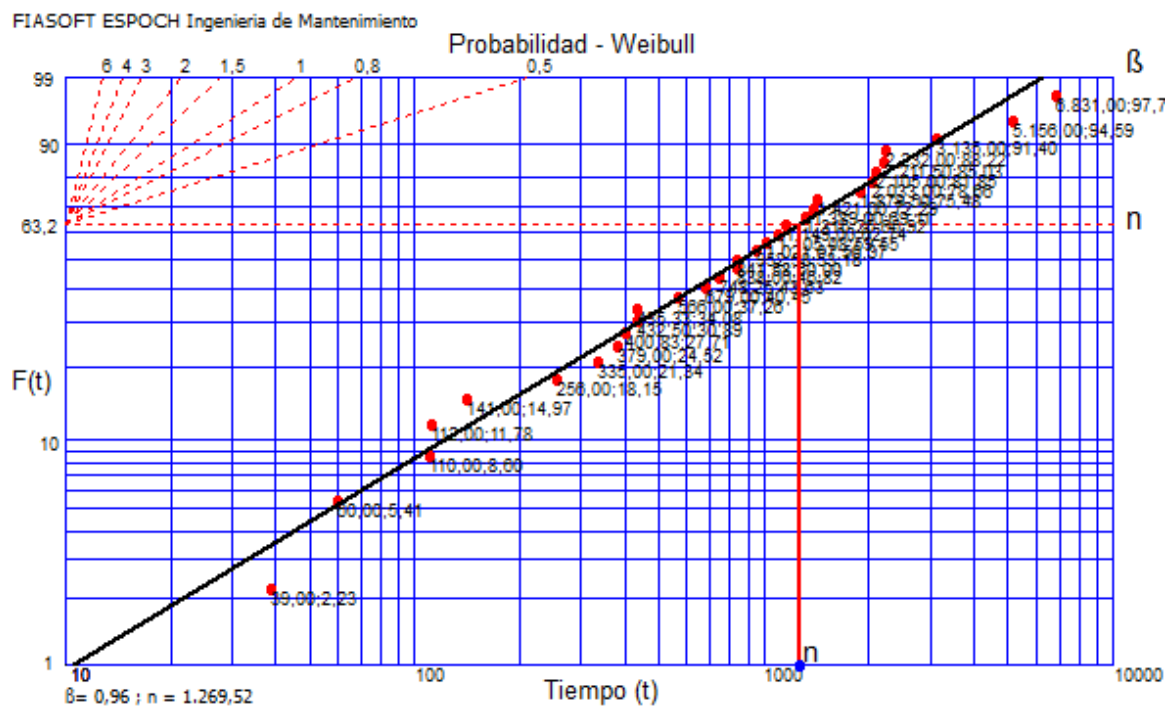


**Figura 0-25.** Resultados de la confiabilidad de la bomba P-1501E.

**Fuente:** Autor-FIASOFT

Los resultados de confiabilidad de la bomba P-1501E comparados con los parámetros obtenidos de forma manual y corroborados con el software de Mora 2007 (hoja de Excel) tienen resultados casi exactos con una desviación del 4.1% para el parámetro  $\beta$ , 0.7 % para el parámetro de escala  $\eta$  y 2.97% para el MTBF.

Se concluye que los parámetros obtenidos por forma manual, con software de Mora 2007 y FIASOFT son los que mantiene la bomba P-1501E para las condiciones actuales.



**Figura 3-26.** Probabilidad de Weibull ( $\beta$  y  $\eta$ ) de bomba P-1501E.

**Fuente:** FIASOFT-Autor



### 3.7. Funciones características de la distribución de Weibull para las bombas del sistema de reinyección de agua.

#### 3.7.1. Funciones características de la bomba P-1501A

Función de confiabilidad:

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t - t_0}{n} \right)^\beta \right]$$
$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t}{1350.2} \right)^{1.373} \right]$$

Función de tasa de falla

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{n} \left( \frac{t - t_0}{n} \right)^{\beta-1}$$
$$\lambda(t) = \frac{1.373}{1350.2} \left( \frac{t}{1350.2} \right)^{0.373}$$

Función acumulada de fallo de No confiabilidad

$$F(t) = 1 - R(t)$$
$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{1350.2} \right)^{1.373} \right]$$

Función de densidad de probabilidad de falla:

$$f(t) = F(t) * \lambda(t)$$

$$f(t) = \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{1350.2} \right)^{1.373} \right] \right\} * \left[ \frac{1.373}{1350.2} \left( \frac{t}{1350.2} \right)^{0.373} \right]$$

Tabulación: Se obtiene los valores en cada ecuación para un intervalo de tiempo que va desde  $t=0$ , donde la bomba tiene un 100% de confiabilidad hasta un tentativo de 6000 horas, esto debido a que las 6000 horas ha perdido su valor de confiabilidad hasta menos del 1%, así podrá estudiarse toda el rango de confiabilidad del activo.

### **3.7.2. Funciones características de la bomba P-1501B**

Función de confiabilidad:

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t - t_0}{n} \right)^\beta \right]$$

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t}{1522.817} \right)^{1.448} \right]$$

		P-1501A			
	B	1,373			
	N	1350,2			
	MTBF	1234,51			
	T-To	<b>f(t)</b> FUNCION DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE FALLA	<b>F(T)</b> FUNCION ACUMULADA DE FALLO DE NO CONFIABILIDAD	<b>R(t)</b> FUNCION DE CONFIABILIDAD	<b><math>\lambda(t)</math></b> FUNCION DE TASA DE FALLA LANDA (t)
1	0	0,000000%	0,000000%	100,00%	0,000000%
2	0,02	0,000000%	0,000023%	100,00%	0,001607%
3	0,04	0,000000%	0,000061%	100,00%	0,002081%
4	0,06	0,000000%	0,000106%	100,00%	0,002421%
5	0,08	0,000000%	0,000157%	100,00%	0,002695%
6	1	0,000000%	0,005034%	99,99%	0,006913%
7	5	0,000006%	0,045871%	99,95%	0,012601%
8	10	0,000019%	0,118766%	99,88%	0,016318%
9	15	0,000039%	0,207145%	99,79%	0,018982%
10	20	0,000065%	0,307324%	99,69%	0,021132%
11	25	0,000096%	0,417267%	99,58%	0,022966%
12	30	0,000132%	0,535639%	99,46%	0,024583%
13	35	0,000172%	0,661478%	99,34%	0,026037%
14	40	0,000217%	0,794052%	99,21%	0,027367%
15	45	0,000267%	0,932777%	99,07%	0,028596%
16	50	0,000320%	1,077176%	98,92%	0,029742%
17	100	0,001065%	2,766135%	97,23%	0,038517%
18	150	0,002140%	4,776814%	95,22%	0,044805%
19	200	0,003496%	7,007825%	92,99%	0,049881%
20	250	0,005095%	9,398652%	90,60%	0,054210%
21	300	0,006909%	11,906922%	88,09%	0,058024%
22	350	0,008912%	14,500456%	85,50%	0,061458%
23	400	0,011081%	17,153631%	82,85%	0,064597%
24	450	0,013395%	19,845426%	80,15%	0,067498%
25	500	0,015837%	22,558263%	77,44%	0,070203%
26	550	0,018388%	25,277262%	74,72%	0,072744%
27	600	0,021032%	27,989722%	72,01%	0,075143%
28	650	0,023756%	30,684760%	69,32%	0,077420%
29	700	0,026546%	33,353034%	66,65%	0,079590%
30	750	0,029388%	35,986527%	64,01%	0,081665%
31	800	0,032273%	38,578378%	61,42%	0,083655%
32	850	0,035188%	41,122743%	58,88%	0,085568%
33	900	0,038124%	43,614678%	56,39%	0,087412%
34	950	0,041073%	46,050038%	53,95%	0,089192%
35	1000	0,044026%	48,425394%	51,57%	0,090915%
36	2000	0,096549%	82,003656%	18,00%	0,117738%
37	3000	0,130090%	94,983939%	5,02%	0,136960%
38	4000	0,150679%	98,822765%	1,18%	0,152474%
39	5000	0,165310%	99,760514%	0,24%	0,165707%
40	6000	0,177291%	99,956964%	0,04%	0,177368%

**Figura 3-27.** Tabulación de las ecuaciones de fiabilidad de la bomba P-1501A en función del tiempo con límite de 6000 horas.

Fuente: Autor

Función de tasa de falla

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - t_0}{n} \right)^{\beta-1}$$

$$\lambda(t) = \frac{1.448}{1522.817} \left( \frac{t}{1522.817} \right)^{0.448}$$

Función acumulada de fallo de No confiabilidad

$$F(t) = 1 - R(t)$$

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{1522.817} \right)^{1.448} \right]$$

Función de densidad de probabilidad de falla:

$$f(t) = F(t) * \lambda(t)$$

$$f(t) = \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{1522.817} \right)^{1.448} \right] \right\} * \left[ \frac{1.448}{1522.817} \left( \frac{t}{1522.817} \right)^{0.448} \right]$$

Tabulación: Se obtiene los valores en cada ecuación para un intervalo de tiempo que va desde  $t = 0$ , donde la bomba tiene un 100% de confiabilidad hasta un tentativo de 6000 horas, donde ha perdido su valor de confiabilidad hasta menos del 1%.

		P-1501B			
	B	1,448			
	N	1522,817			
	MTBF	1381,09			
	T-To	f(t) FUNCION DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE FALLA	F(T) FUNCION ACUMULADA DE FALLO DE NO CONFIABILIDAD	R(t) FUNCION DE CONFIABILIDAD	λ(t) FUNCION DE TASA DE FALLA LANDA (t)
1	0	0,000000%	0,00%	100,00%	0,000000%
2	0,02	0,000000%	0,00%	100,00%	0,001437%
3	0,04	0,000000%	0,00%	100,00%	0,001861%
4	0,06	0,000000%	0,00%	100,00%	0,002164%
5	0,08	0,000000%	0,00%	100,00%	0,002409%
6	1	0,000000%	0,00%	100,00%	0,006181%
7	5	0,000003%	0,03%	99,97%	0,011265%
8	10	0,000010%	0,07%	99,93%	0,014589%
9	15	0,000021%	0,12%	99,88%	0,016971%
10	20	0,000036%	0,19%	99,81%	0,018893%
11	25	0,000053%	0,26%	99,74%	0,020533%
12	30	0,000074%	0,34%	99,66%	0,021978%
13	35	0,000098%	0,42%	99,58%	0,023279%
14	40	0,000126%	0,51%	99,49%	0,024467%
15	45	0,000155%	0,61%	99,39%	0,025566%
16	50	0,000188%	0,71%	99,29%	0,026591%
17	100	0,000661%	1,92%	98,08%	0,034436%
18	150	0,001373%	3,43%	96,57%	0,040058%
19	200	0,002298%	5,15%	94,85%	0,044596%
20	250	0,003415%	7,05%	92,95%	0,048466%
21	300	0,004708%	9,08%	90,92%	0,051877%
22	350	0,006162%	11,21%	88,79%	0,054947%
23	400	0,007761%	13,44%	86,56%	0,057753%
24	450	0,009493%	15,73%	84,27%	0,060346%
25	500	0,011344%	18,07%	81,93%	0,062765%
26	550	0,013304%	20,46%	79,54%	0,065036%
27	600	0,015359%	22,86%	77,14%	0,067182%
28	650	0,017501%	25,28%	74,72%	0,069217%
29	700	0,019719%	27,71%	72,29%	0,071157%
30	750	0,022002%	30,13%	69,87%	0,073012%
31	800	0,024341%	32,55%	67,45%	0,074791%
32	850	0,026729%	34,94%	65,06%	0,076502%
33	900	0,029156%	37,31%	62,69%	0,078150%
34	950	0,031615%	39,65%	60,35%	0,079742%
35	1000	0,034099%	41,95%	58,05%	0,081282%
36	2000	0,081394%	77,32%	22,68%	0,105263%
37	3000	0,113962%	93,07%	6,93%	0,122449%
38	4000	0,133940%	98,26%	1,74%	0,136319%
39	5000	0,147598%	99,63%	0,37%	0,148150%
40	6000	0,158466%	99,93%	0,07%	0,158575%

**Figura 3-28.** Tabulación de las ecuaciones de fiabilidad de la bomba P-1501B en función del tiempo con límite de 6000 horas.

**Fuente:** Autor-FIASOFT

### 3.7.3. Funciones características de la bomba P-1501C

Función de confiabilidad:

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t - t_0}{n} \right)^\beta \right]$$

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t}{670.235} \right)^{0.995} \right]$$

Función de tasa de falla

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - t_0}{n} \right)^{\beta-1}$$

$$\lambda(t) = \frac{0.995}{670.235} \left( \frac{t}{670.235} \right)^{-0.005}$$

Función acumulada de fallo de No confiabilidad

$$F(t) = 1 - R(t)$$

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{670.235} \right)^{0.995} \right]$$

Función de densidad de probabilidad de falla:

$$f(t) = F(t) * \lambda(t)$$

$$f(t) = \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{670.235} \right)^{0.995} \right] \right\} * \left[ \frac{0.995}{670.235} \left( \frac{t}{670.235} \right)^{-0.005} \right]$$

Tabulación: Se obtiene los valores en cada ecuación para un intervalo de tiempo que va desde  $t=0$ , donde la bomba tiene un 100% de confiabilidad hasta un tentativo de 6000 horas, donde ha perdido su valor de confiabilidad hasta menos del 1%

		P-1501C			
	B	0,995			
	N	670,235			
	MTBF	671,81			
	T-To	<b>f(t)</b> FUNCION DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE FALLA	<b>F(T)</b> FUNCION ACUMULADA DE FALLO DE NO CONFIABILIDAD	<b>R(t)</b> FUNCION DE CONFIABILIDAD	<b><math>\lambda(t)</math></b> FUNCION DE TASA DE FALLA LANDA (t)
1	0	0,00000000%	0,00%	100,00%	0,00000000%
2	0,02	0,00000010%	0,00%	100,00%	0,00304628%
3	0,04	0,00000025%	0,01%	99,99%	0,00394501%
4	0,06	0,00000043%	0,01%	99,99%	0,00458910%
5	0,08	0,00000064%	0,01%	99,99%	0,00510891%
6	1	0,00002018%	0,15%	99,85%	0,01310564%
7	5	0,00018192%	0,76%	99,24%	0,02388707%
8	10	0,00046777%	1,51%	98,49%	0,03093444%
9	15	0,00081148%	2,26%	97,74%	0,03598500%
10	20	0,00119828%	2,99%	97,01%	0,04006099%
11	25	0,00161995%	3,72%	96,28%	0,04353791%
12	30	0,00207106%	4,44%	95,56%	0,04660161%
13	35	0,00254773%	5,16%	94,84%	0,04935953%
14	40	0,00304695%	5,87%	94,13%	0,05188013%
15	45	0,00356635%	6,58%	93,42%	0,05421009%
16	50	0,00410399%	7,28%	92,72%	0,05638284%
17	100	0,01020988%	13,98%	86,02%	0,07301740%
18	150	0,01714610%	20,19%	79,81%	0,08493870%
19	200	0,02452239%	25,93%	74,07%	0,09455964%
20	250	0,03212461%	31,26%	68,74%	0,10276653%
21	300	0,03981764%	36,20%	63,80%	0,10999806%
22	350	0,04751033%	40,78%	59,22%	0,11650783%
23	400	0,05513904%	45,03%	54,97%	0,12245745%
24	450	0,06265850%	48,97%	51,03%	0,12795707%
25	500	0,07003648%	52,63%	47,37%	0,13308561%
26	550	0,07725012%	56,02%	43,98%	0,13790179%
27	600	0,08428363%	59,17%	40,83%	0,14245065%
28	650	0,09112651%	62,09%	37,91%	0,14676759%
29	700	0,09777234%	64,80%	35,20%	0,15088099%
30	750	0,10421782%	67,32%	32,68%	0,15481404%
31	800	0,11046211%	69,65%	30,35%	0,15858592%
32	850	0,11650621%	71,82%	28,18%	0,16221271%
33	900	0,12235260%	73,84%	26,16%	0,16570808%
34	950	0,12800487%	75,71%	24,29%	0,16908371%
35	1000	0,13346742%	77,44%	22,56%	0,17234969%
36	2000	0,21172033%	94,86%	5,14%	0,22319781%
37	3000	0,25658349%	98,82%	1,18%	0,25963855%
38	4000	0,28826739%	99,73%	0,27%	0,28904758%
39	5000	0,31393934%	99,94%	0,06%	0,31413421%
40	6000	0,33619138%	99,99%	0,01%	0,33623939%

**Figura 3-29.** Tabulación de las ecuaciones de fiabilidad de la bomba P-1501C en función del tiempo con límite de 6000 horas.

**Fuente:** Autor-FIASOFT

### 3.7.4. Funciones características de la bomba P-1501D

Función de confiabilidad:

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t - t_0}{n} \right)^\beta \right]$$

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t}{1045.89} \right)^{0.789} \right]$$

Función de tasa de falla

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - t_0}{n} \right)^{\beta-1}$$

$$\lambda(t) = \frac{0.789}{1045.89} \left( \frac{t}{1045.89} \right)^{-0.211}$$

Función acumulada de fallo de No confiabilidad

$$F(t) = 1 - R(t)$$

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{1045.89} \right)^{0.789} \right]$$

Función de densidad de probabilidad de falla:

$$f(t) = F(t) * \lambda(t)$$

$$f(t) = \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{1045.89} \right)^{0.789} \right] \right\} * \left[ \frac{0.789}{1045.89} \left( \frac{t}{1045.89} \right)^{-0.211} \right]$$

Tabulación: Se obtiene los valores en cada ecuación para un intervalo de tiempo que va desde t =0, donde la bomba tiene un 100% de confiabilidad hasta un tentativo de 6000 horas, donde ha perdido su valor de confiabilidad hasta menos del 1%.



		P-1501D			
	B	0,789			
	N	1045,894			
	MTBF	1197,31			
		<b>f(t)</b> FUNCION DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE FALLA	<b>F(T)</b> FUNCION ACUMULADA DE FALLO DE NO CONFIABILIDAD	<b>R(t)</b> FUNCION DE CONFIABILIDAD	<b>λ(t)</b> FUNCION DE TASA DE FALLA LANDA (t)
	T-To				
1	0	0,000000000%	0,00%	100,00%	0,000000000%
2	0,02	0,000000248%	0,02%	99,98%	0,001311232%
3	0,04	0,000000555%	0,03%	99,97%	0,001698083%
4	0,06	0,000000889%	0,05%	99,95%	0,001975323%
5	0,08	0,000001242%	0,06%	99,94%	0,002199066%
6	1	0,000023339%	0,41%	99,59%	0,005641159%
7	5	0,000150650%	1,47%	98,53%	0,010281892%
8	10	0,000335303%	2,52%	97,48%	0,013315346%
9	15	0,000534534%	3,45%	96,55%	0,015489297%
10	20	0,000743398%	4,31%	95,69%	0,017243756%
11	25	0,000959405%	5,12%	94,88%	0,018740353%
12	30	0,001181029%	5,89%	94,11%	0,020059085%
13	35	0,001407233%	6,62%	93,38%	0,021246198%
14	40	0,001637262%	7,33%	92,67%	0,022331161%
15	45	0,001870544%	8,02%	91,98%	0,023334063%
16	50	0,002106625%	8,68%	91,32%	0,024269297%
17	100	0,004563769%	14,52%	85,48%	0,031429437%
18	150	0,007103844%	19,43%	80,57%	0,036560813%
19	200	0,009664983%	23,75%	76,25%	0,040702025%
20	250	0,012219033%	27,62%	72,38%	0,044234581%
21	300	0,014750694%	31,15%	68,85%	0,047347305%
22	350	0,017250928%	34,40%	65,60%	0,050149355%
23	400	0,019714185%	37,40%	62,60%	0,052710293%
24	450	0,022137026%	40,19%	59,81%	0,055077537%
25	500	0,024517366%	42,80%	57,20%	0,057285054%
26	550	0,026854029%	45,24%	54,76%	0,059358121%
27	600	0,029146460%	47,53%	52,47%	0,061316121%
28	650	0,031394541%	49,70%	50,30%	0,063174293%
29	700	0,033598470%	51,73%	48,27%	0,064944857%
30	750	0,035758666%	53,66%	46,34%	0,066637788%
31	800	0,037875714%	55,49%	44,51%	0,068261345%
32	850	0,039950313%	57,22%	42,78%	0,069822456%
33	900	0,041983246%	58,86%	41,14%	0,071326994%
34	950	0,043975354%	60,42%	39,58%	0,072779991%
35	1000	0,045927517%	61,91%	38,09%	0,074185792%
36	2000	0,077946090%	81,13%	18,87%	0,096072735%
37	3000	0,100513773%	89,94%	10,06%	0,111758200%
38	4000	0,117444133%	94,40%	5,60%	0,124416954%
39	5000	0,130863735%	96,78%	3,22%	0,135215184%
40	6000	0,141993082%	98,11%	1,89%	0,144730083%

**Figura 3-30.** Tabulación de las ecuaciones de fiabilidad de la bomba P-1501D en función del tiempo con límite de 6000 horas.

Fuente: Autor

### 3.7.5. Funciones características de la bomba P-1501E

Función de confiabilidad:

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t - t_0}{n} \right)^\beta \right]$$

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t}{1287.514} \right)^{0.91} \right]$$

Función de tasa de falla

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - t_0}{n} \right)^{\beta-1}$$

$$\lambda(t) = \frac{0.91}{1287.514} \left( \frac{t}{1287.514} \right)^{-0.09}$$

Función acumulada de fallo de No confiabilidad

$$F(t) = 1 - R(t)$$

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{1287.514} \right)^{0.91} \right]$$

Función de densidad de probabilidad de falla:

$$f(t) = F(t) * \lambda(t)$$

$$f(t) = \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{1287.514} \right)^{0.91} \right] \right\} * \left[ \frac{0.91}{1287.514} \left( \frac{t}{1287.514} \right)^{-0.09} \right]$$

Tabulación: Se obtiene los valores en cada ecuación para un intervalo de tiempo que va desde  $t=0$ , donde la bomba tiene un 100% de confiabilidad hasta un tentativo de 6000 horas, donde ha perdido su valor de confiabilidad hasta menos del 1%.

		P-1501E			
	B	0,91			
	N	1287,5143			
	MTBF	1346,81			
	T-To	<b>f(t)</b> FUNCION DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE FALLA	<b>F(T)</b> FUNCION ACUMULADA DE FALLO DE NO CONFIABILIDAD	<b>R(t)</b> FUNCION DE CONFIABILIDAD	<b>λ(t)</b> FUNCION DE TASA DE FALLA LANDA (t)
1	0	0,00000000%	0,00%	100,00%	0,00000000%
2	0,02	0,00000005%	0,00%	100,00%	0,00113687%
3	0,04	0,00000012%	0,01%	99,99%	0,00147228%
4	0,06	0,00000020%	0,01%	99,99%	0,00171266%
5	0,08	0,00000028%	0,01%	99,99%	0,00190665%
6	1	0,00000723%	0,15%	99,85%	0,00489104%
7	5	0,00005687%	0,64%	99,36%	0,00891468%
8	10	0,00013800%	1,20%	98,80%	0,01154477%
9	15	0,00023155%	1,72%	98,28%	0,01342964%
10	20	0,00033405%	2,23%	97,77%	0,01495081%
11	25	0,00044366%	2,73%	97,27%	0,01624840%
12	30	0,00055919%	3,22%	96,78%	0,01739178%
13	35	0,00067981%	3,69%	96,31%	0,01842104%
14	40	0,00080490%	4,16%	95,84%	0,01936173%
15	45	0,00093398%	4,62%	95,38%	0,02023127%
16	50	0,00106664%	5,07%	94,93%	0,02104214%
17	100	0,00253763%	9,31%	90,69%	0,02725018%
18	150	0,00417896%	13,18%	86,82%	0,03169923%
19	200	0,00592140%	16,78%	83,22%	0,03528977%
20	250	0,00772831%	20,15%	79,85%	0,03835259%
21	300	0,00957666%	23,33%	76,67%	0,04105141%
22	350	0,01145071%	26,34%	73,66%	0,04348086%
23	400	0,01333902%	29,19%	70,81%	0,04570127%
24	450	0,01523305%	31,90%	68,10%	0,04775373%
25	500	0,01712622%	34,48%	65,52%	0,04966771%
26	550	0,01901338%	36,94%	63,06%	0,05146512%
27	600	0,02089046%	39,30%	60,70%	0,05316276%
28	650	0,02275420%	41,54%	58,46%	0,05477384%
29	700	0,02460199%	43,69%	56,31%	0,05630897%
30	750	0,02643174%	45,75%	54,25%	0,05777679%
31	800	0,02824175%	47,72%	52,28%	0,05918446%
32	850	0,03003068%	49,61%	50,39%	0,06053798%
33	900	0,03179745%	51,42%	48,58%	0,06184246%
34	950	0,03354123%	53,15%	46,85%	0,06310225%
35	1000	0,03526137%	54,82%	45,18%	0,06432111%
36	2000	0,06458026%	77,53%	22,47%	0,08329769%
37	3000	0,08571377%	88,46%	11,54%	0,09689742%
38	4000	0,10134815%	93,95%	6,05%	0,10787291%
39	5000	0,11346473%	96,78%	3,22%	0,11723527%
40	6000	0,12331446%	98,27%	1,73%	0,12548495%

**Figura 3-31.** Tabulación de las ecuaciones de fiabilidad de la bomba P-1501E en función del tiempo con límite de 6000 horas.

Fuente: Autor

### 3.8. Determinación de la Disponibilidad inherente

#### 3.8.1. Disponibilidad P-1501A

Para la bomba P-1501 A, con los MTBF y MTTR obtenidos en cálculos anteriores la disponibilidad intrínseca tiene un valor de 97.55%.

$$A_t = \frac{1234.51}{1234.51 + 30.98}$$

$$A_t = 97.55\%$$

Según la hoja de cálculo del software RAM (Mora 2007) se encontró la misma disponibilidad de 97.55%, por lo que se concluye que los cálculos son los correctos.

C	M	MTBF	1234.51
		MTTR	30.98
		DISP	97.55%

Retorna

**Figura 3-32.** Resultados de Disponibilidad de bomba P-1501A en software RAM (Mora 2007).

**Fuente:** Autor-FIASOFT

### 3.8.2. Disponibilidad P-1501B

Para la bomba P-1501 B, con los MTBF y MTTR obtenidos la disponibilidad intrínseca tiene un valor de 98.31%.

$$A_t = \frac{1381.09}{1381.09 + 23.67}$$

$$A_t = 98.31\%$$

Según la hoja de cálculo del software RAM (Mora 2007) se encontró la misma disponibilidad de 98.31%, por lo que se concluye que los cálculos son los correctos.

C	M	MTBF	1381.09
		MTTR	23.67
		DISP	98.31%
Retorno			

**Figura 3-33.** Resultados de Disponibilidad de bomba P-1501B en software RAM  
(Mora 2007).

**Fuente:** Autor-FIASOFT

### 3.8.3. Disponibilidad P-1501C

Para la bomba P-1501 C, con los MTBF y MTTR obtenidos en cálculos anteriores la disponibilidad intrínseca tiene un valor de 99.49%.

$$A_t = \frac{13671.81}{671.81 + 3.43}$$

$$A_t = 99.49\%$$

Según la hoja de cálculo del software RAM (Mora 2007) se encontró la misma disponibilidad de 99.49% , por lo que se concluye que los cálculos son los correctos.

C	M	MTBF	671.81
		MTTR	3.43
		DISP	99.49%
Retorno			

**Figura 3-34.** Resultados de Disponibilidad de bomba P-1501C en software RAM  
(Mora 2007).

**Fuente:** Autor-FIASOFT

#### 3.8.4. Disponibilidad P-1501D

Para la bomba P-1501 D, con los MTBF y MTTR obtenidos la disponibilidad intrínseca tendría un valor de 98.94%.

$$A_t = \frac{1197.31}{1197.31 + 12.79}$$
$$A_t = 98.94\%$$

Según la hoja de cálculo del software se encontró la misma disponibilidad de 98.94%, por lo que se concluye que los cálculos son los correctos.

C	M	MTBF	1197.31
		MTTR	12.79
		DISP	98.94%
Retorno			

**Figura 3-35.** Resultados de Disponibilidad de P-1501D en software RAM (Mora 2007).

**Fuente:** Autor-FIASOFT

#### 3.8.5. Disponibilidad P-1501E

Para la bomba P-1501 E, con los MTBF y MTTR obtenidos en cálculos anteriores la disponibilidad intrínseca tendría un valor de 93.04%.

$$A_t = \frac{1346.81}{1346.81 + 100.76}$$
$$A_t = 93.04\%$$

Según la hoja de cálculo del software RAM (Mora 2007) se encontró la misma disponibilidad de 93.04% que la calculada, por lo que se concluye que los cálculos son los correctos.

C	M
Retorno	
MTBF	1346.81
MTTR	100.76
DISP	93.04%

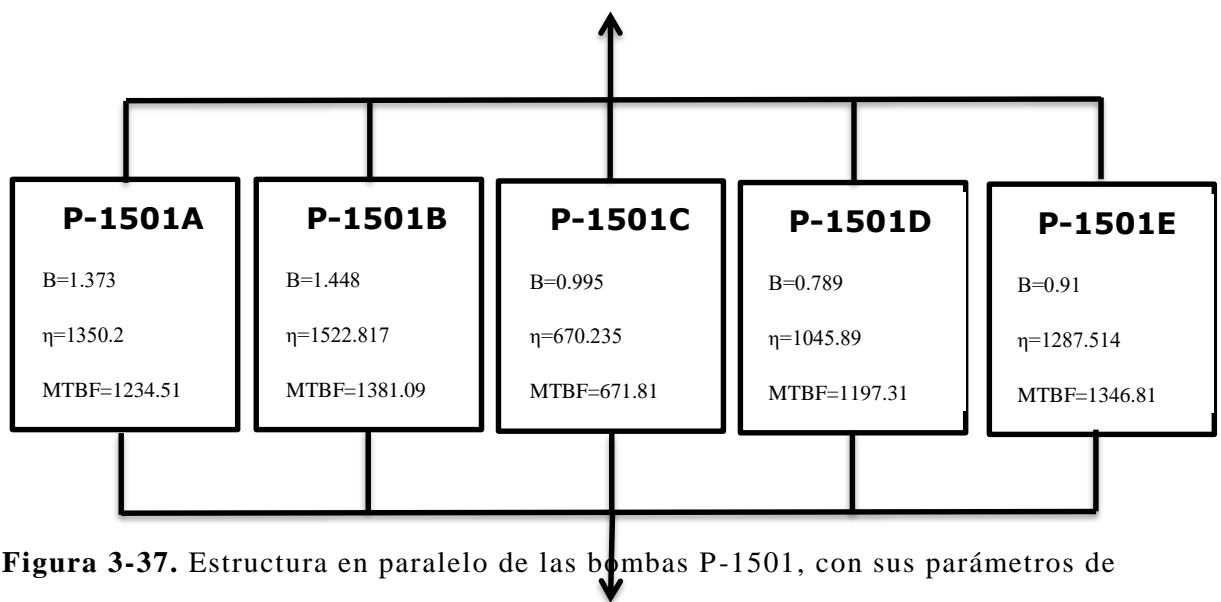
**Figura 3-36.** Resultados de Disponibilidad de bomba P-1501E en software RAM (Mora 2007).

**Fuente:** Autor-FIASOFT

### 3.9. Calculo de la Confiabilidad del sistema.

Como se explicó anteriormente el sistema de bombas de reinyección está compuesto por las cinco unidades en paralelo, para alcanzar la función del sistema.

Una vez obtenidos los índices de confiabilidad de cada una de las bombas, se obtiene el índice de confiabilidad del sistema con la combinación en paralelo que mantiene el sistema.



**Figura 3-37.** Estructura en paralelo de las bombas P-1501, con sus parámetros de confiabilidad.

**Fuente:** Autor

Tabulando cada uno de los valores de las confiabilidades de las bombas P-1501A/B/C/D/E, a diferentes tiempos y reemplazando en la ecuación de la confiabilidad del sistema  $R_s$ , se logra obtener la confiabilidad del sistema a diferentes tiempos. Para todas las ecuaciones mostradas el valor de tiempo inicial ( $t_0 = 0$ ).



[illegible]

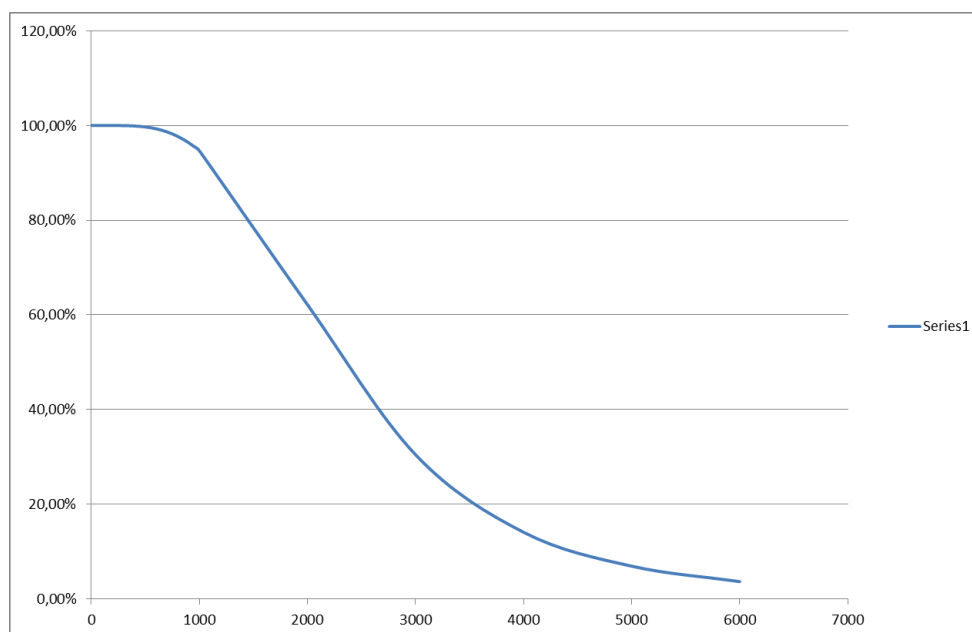
**Tabla 3-37.** Confiabilidad del sistema de reinyección de agua y las confiabilidades de las bombas P-1501 A/B/C/D/E en función del tiempo.

		P-1501A	P-1501B	P-1501E	P-1501C	P-1501D	SISTEMA DE REINYECCION
		1,373	1,448	0,91	0,995	0,789	
B							
N		1350,2	1522,817	1287,5143	670,235	1045,894	
MTBF		1234,51	1381,09	1346,81	671,81	1197,31	
T-To		R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)
		FUNCION DE CONFIABILIDAD	FUNCION DE CONFIABILIDAD	FUNCION DE CONFIABILIDAD	FUNCION DE CONFIABILIDAD	FUNCION DE CONFIABILIDAD	FUNCION DE CONFIABILIDAD
1	0	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
2	0,02	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	99,98%	100,00%
3	0,04	100,00%	100,00%	99,99%	99,99%	99,97%	100,00%
4	0,06	100,00%	100,00%	99,99%	99,99%	99,95%	100,00%
5	0,08	100,00%	100,00%	99,99%	99,99%	99,94%	100,00%
6	1	99,99%	100,00%	99,85%	99,85%	99,59%	100,00%
7	5	99,95%	99,97%	99,36%	99,24%	98,53%	100,00%
8	10	99,88%	99,93%	98,80%	98,49%	97,48%	100,00%
9	15	99,79%	99,88%	98,28%	97,74%	96,55%	100,00%
10	20	99,69%	99,81%	97,77%	97,01%	95,69%	100,00%
11	25	99,58%	99,74%	97,27%	96,28%	94,88%	100,00%
12	30	99,46%	99,66%	96,78%	95,56%	94,11%	100,00%

13	35	99,34%	99,58%	96,31%	94,84%	93,38%	100,00%
14	40	99,21%	99,49%	95,84%	94,13%	92,67%	100,00%
15	45	99,07%	99,39%	95,38%	93,42%	91,98%	100,00%
16	50	98,92%	99,29%	94,93%	92,72%	91,32%	100,00%
17	100	97,23%	98,08%	90,69%	86,02%	85,48%	100,00%
18	150	95,22%	96,57%	86,82%	79,81%	80,57%	100,00%
19	200	92,99%	94,85%	83,22%	74,07%	76,25%	100,00%
20	250	90,60%	92,95%	79,85%	68,74%	72,38%	99,99%
21	300	88,09%	90,92%	76,67%	63,80%	68,85%	99,97%
22	350	85,50%	88,79%	73,66%	59,22%	65,60%	99,94%
23	400	82,85%	86,56%	70,81%	54,97%	62,60%	99,89%
24	450	80,15%	84,27%	68,10%	51,03%	59,81%	99,80%
25	500	77,44%	81,93%	65,52%	47,37%	57,20%	99,68%
26	550	74,72%	79,54%	63,06%	43,98%	54,76%	99,52%
27	600	72,01%	77,14%	60,70%	40,83%	52,47%	99,29%
28	650	69,32%	74,72%	58,46%	37,91%	50,30%	99,01%
29	700	66,65%	72,29%	56,31%	35,20%	48,27%	98,65%
30	750	64,01%	69,87%	54,25%	32,68%	46,34%	98,21%
31	800	61,42%	67,45%	52,28%	30,35%	44,51%	97,68%
32	850	58,88%	65,06%	50,39%	28,18%	42,78%	97,07%
33	900	56,39%	62,69%	48,58%	26,16%	41,14%	96,36%
34	950	53,95%	60,35%	46,85%	24,29%	39,58%	95,56%
35	1000	51,57%	58,05%	45,18%	22,56%	38,09%	94,66%

36	2000	18,00%	22,68%	22,47%	5,14%	18,87%	62,17%
37	3000	5,02%	6,93%	11,54%	1,18%	10,06%	30,50%
38	4000	1,18%	1,74%	6,05%	0,27%	5,60%	14,12%
39	5000	0,24%	0,37%	3,22%	0,06%	3,22%	6,96%
40	6000	0,04%	0,07%	1,73%	0,01%	1,89%	3,71%

**Fuente:** Autor

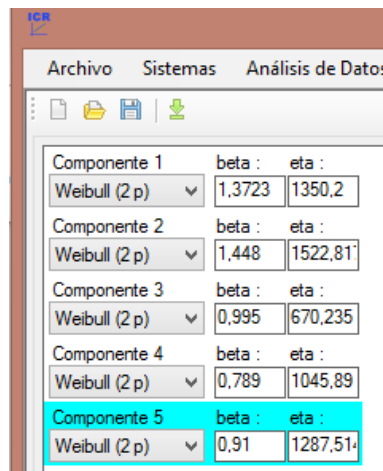


**Figura 3-39.** Gráfico de la confiabilidad del sistema de reinyección de agua en el tiempo.

**Fuente:** Autor

Adicional a los cálculos de la confiabilidad realizados en Excel y la gráfica obtenida para la confiabilidad, en la presente investigación se utiliza la simulación en software ICR. El software ICR permite simular diferentes componentes en paralelo o en serie, y obtener la fiabilidad del sistema.

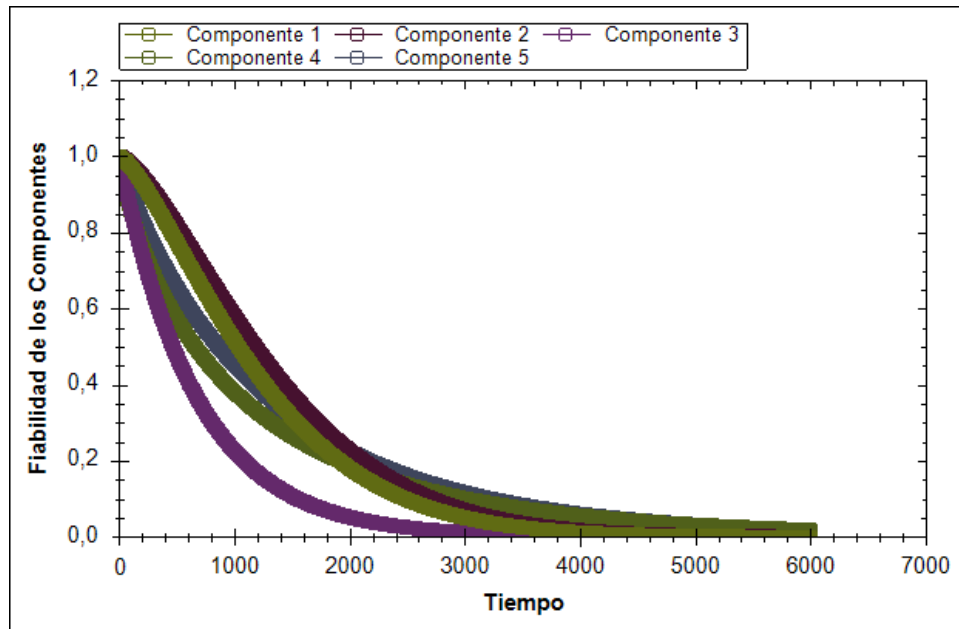
El software ICR solicita los parámetros de forma y escala de cada una de las bombas que pertenecen al sistema. Se introduce las funciones de cada una de las bombas P-1501 A/B/C/D/E, en este caso todas son Weibull.



**Figura 3-40.** Software ICR y los parámetros de confiabilidad de las bombas P-1501A/B/C/D/E.

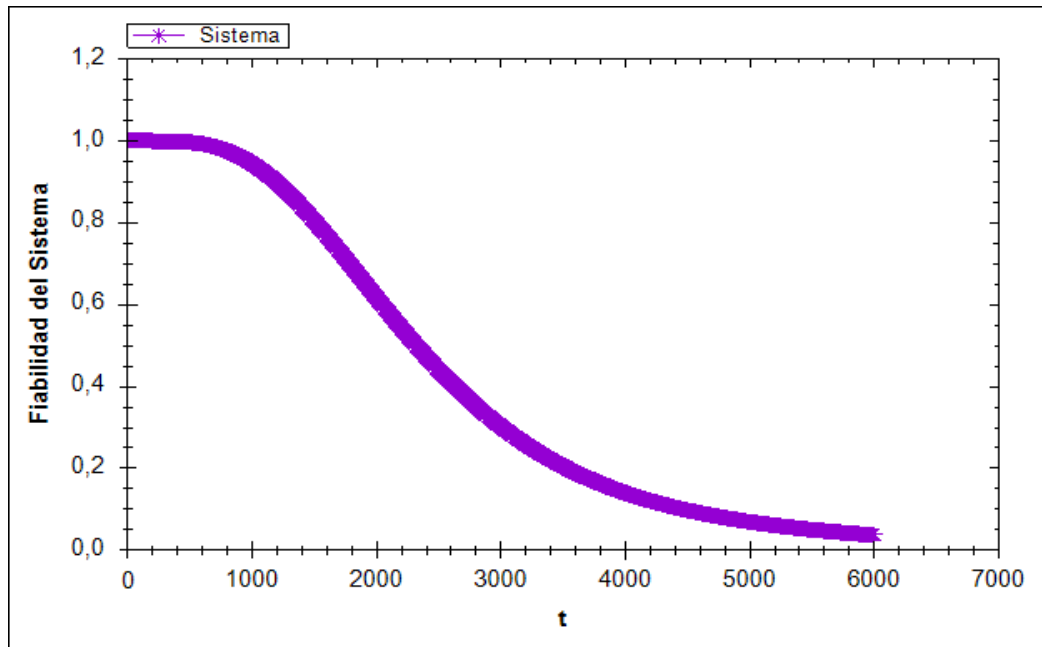
Fuente: Autor

De la simulación en el software se obtienen dos gráficos: uno donde se visualiza las fiabilidades de cada uno de los componentes del sistema y otra donde está la fiabilidad el sistema.



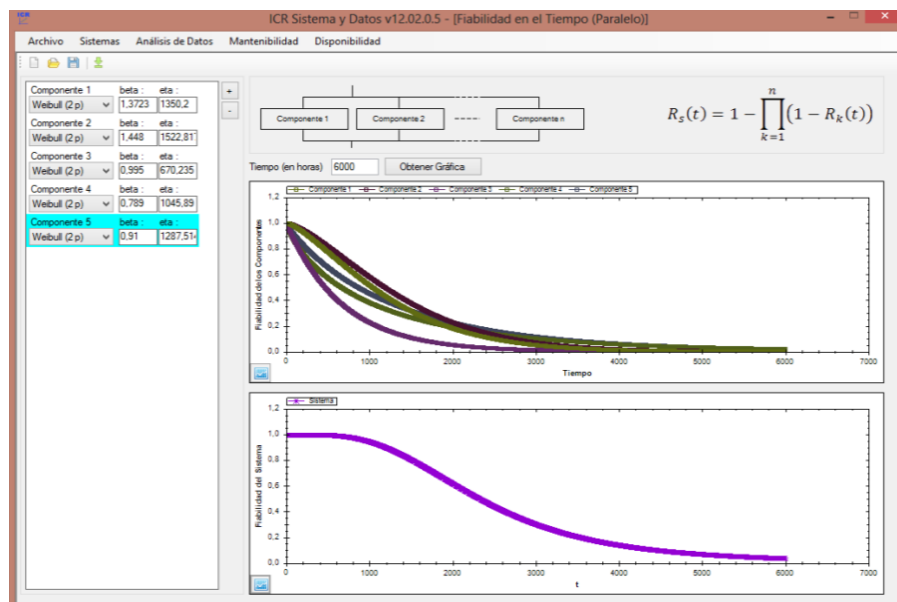
**Figura 3-41.** Software ICR. Curvas de fiabilidad de cada uno de las bombas del sistema de reinyección de agua.

Fuente: Autor-ICR



**Figura 3-42.** Software ICR. Curva de fiabilidad del sistema de reinyección.

**Fuente:** Autor-ICR



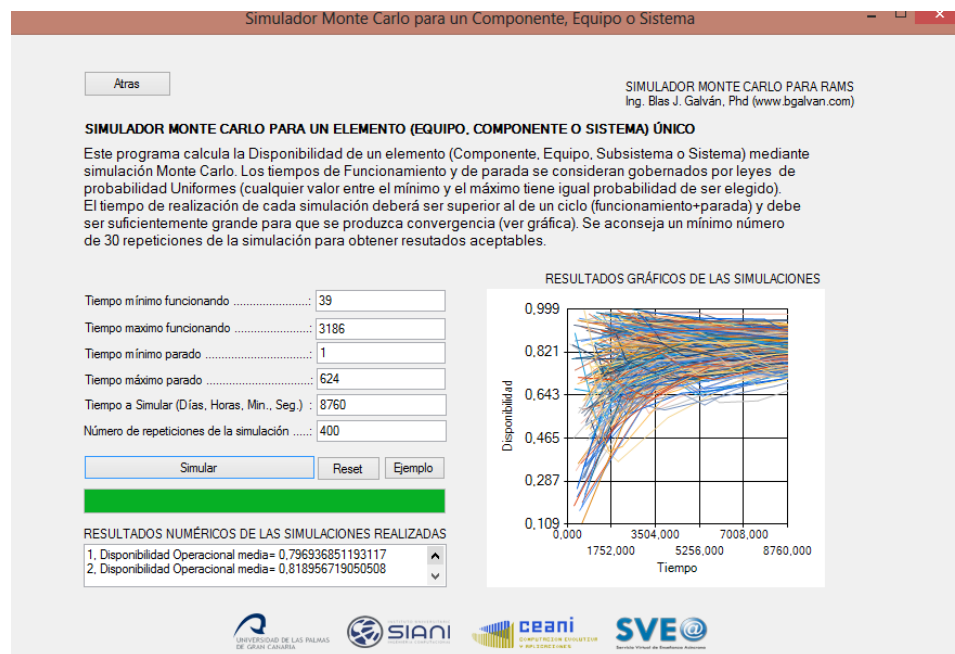
**Figura 3-43.** Software ICR. Curvas de fiabilidad del sistema y bombas de reinyección ZPF.

**Fuente:** Autor-ICR

### 3.10. Cálculo de la Disponibilidad del sistema.

Con la ayuda de simulación Montecarlo en el software SIM se puede obtener la disponibilidad del sistema de reinyección de agua. Para esto se requiere tiempos mínimos y máximos de buen funcionamiento y parada del sistema. Como se sabe, el sistema está en paralelo y básicamente la falla de uno de sus componentes (bombas) implica no cumplir con la función del mismo, se seleccionó los tiempos más acertados como mínimos y máximos entre todas las bombas que conforman el sistema de reinyección.

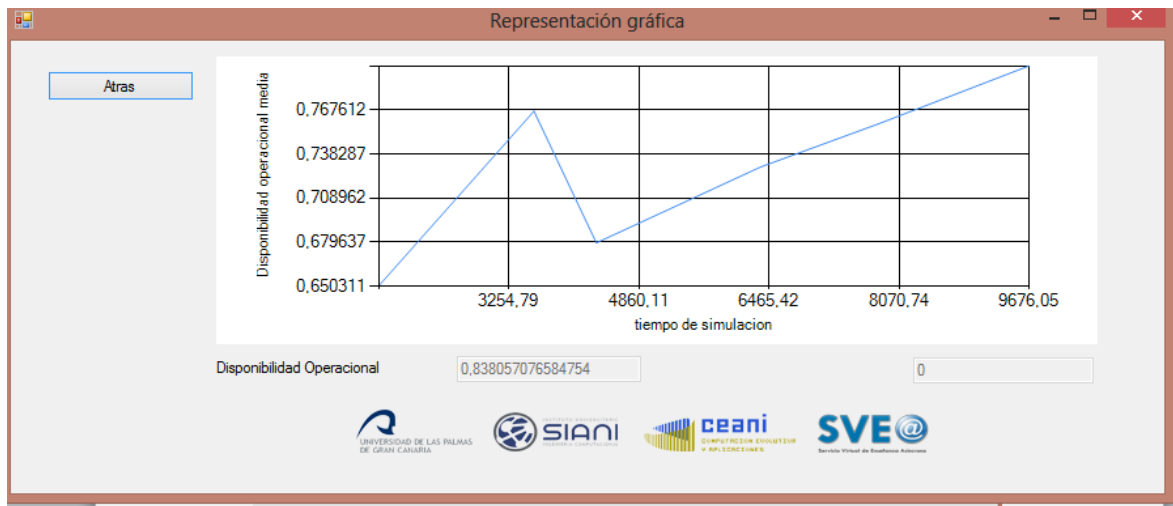
En base a los datos de las bombas de reinyección de agua P-1501 A/B/C/D/E se simula con ayuda del software SIM, para un tiempo de 1 año, 8760 horas con 400 iteraciones.



**Figura 0-44.** Programa-software ICR. Resultados de la simulación de la disponibilidad del sistema de reinyección de agua.

**Fuente:** Autor-Software SIM





**Figura 0-45.** Programa-software ICR. Resultado gráfico de la simulación de la disponibilidad del sistema de reinyección de agua.

**Fuente:** Autor-Software SIM

### 3.11. Análisis de estrategias

Una vez obtenidos los índices de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de cada uno de los elementos y del sistema, se pueden analizar cada uno de sus parámetros para realizar ciertas conclusiones y aseveraciones.

Las cinco bombas analizadas siguen una distribución de Weibull en sus diferentes etapas en lo que tiene que ver con la confiabilidad.

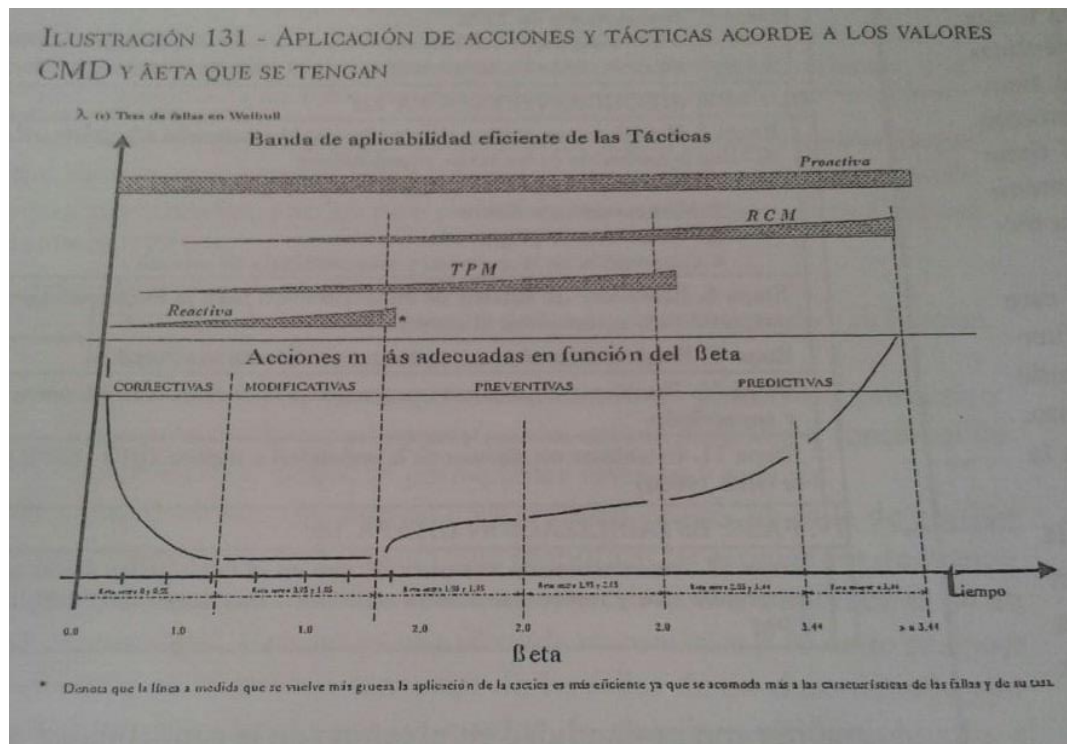
Para la bomba P-1501A y P-1501B que se encuentra en la etapa I de la fase III, la tasa de fallas se incrementa en varias formas causadas por fatiga, corrosión, envejecimiento, fricción y cargas cíclicas. Estas causas pueden ser disminuidas con tareas proactivas, reemplazo de componentes, tecnología, instrumentos avanzados específicos en orden técnico, ejemplo: vigilancia de

temperatura, control de corrosión, resistencia eléctrica, lubricación engrase y aceite, monitoreo de causas y efectos eléctricos, termografía infrarroja, análisis de vibraciones, ferrografía análisis de lubricantes, análisis espectrométrico, cromatografía, líquidos penetrantes, ensayo de partículas magnéticas, ultrasonido, control de ruido, filtros magnéticos, corrientes inducidas. (Mora 2007).

Para la bomba P-1501C que se encuentra en la Fase II, rodaje o vida útil, con sus características:  $\beta$  y Tasa de falla son fijos en valor, causados por: mantenimiento inadecuado, entorno de trabajo, cargas aleatorias, errores humanos, situaciones fortuitas, eventos inesperados al azar. En esta fase puede mejorar sus parámetros CMD con rediseño de máquina o de proceso, revisión técnica de procesos u operaciones. (Mora 2007)

Para la bomba P-1501D y P-1501E que se encuentra en la Fase I, mortalidad infantil, tiene como característica la disminución paulatinamente o drásticamente de la tasa de falla con el tiempo. Sus causas de falla probables son: Defectos de producción, fallas de soldadura, fisuras, componentes imperfectos, calidad defectuosa, medio ambiente fuera de control, condiciones fuera de estándares, ensambles inadecuados, procesos inadecuados, se atenúan estas causa mediante chequeo de funcionamiento, control de calidad, examen de aceptación, FMECA o análisis de falla, acciones correctivas buenas. (Mora 2007)

A nivel táctico de mantenimiento, una vez claro la ubicación física de los equipos en sus curvas de falla, de tal forma que haya coherencia entre los estados de los equipos y la táctica que se desee implementar; La decisión de la táctica a seleccionar debe partir de la premisa de la fase que se encuentra en la curva de la bañera o Davies.



**Figura 0-46.** Aplicación de acciones y tácticas acorde a los valores CMD y  $\beta$  que se tengan.

**Fuente:** Mora (2007) Ilustración 131.

- Para las bombas P-1501A y P-1501B cuyos  $\beta$  están entre 1.05 y 1.95 la táctica recomendada es TPM y un poco de RCM.
- Para la bomba P-1501C cuyo  $\beta$  está entre 0.95 y 1.05 la táctica más adecuada es la Reactiva.
- Para la bomba P-1501D y P-1501E cuyos  $\beta$  están entre 0 y 0.95 la táctica recomendada aunque en menor medida que las otras es la Reactiva.

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Parámetros e índices de confiabilidad

En el capítulo 3 se calculó y comprobó los parámetros de confiabilidad para cada una de las bombas del sistema de reinyección de agua. A continuación se indica una tabla resumen de cada una de los parámetros de confiabilidad de las bombas del sistema de reinyección de agua P-1501A, P-1501B, P-1501C, P-1501D y P-1501E, entendiéndose como resultados de la investigación.

**Tabla 4-1.** Tabla de resultados de parámetros de confiabilidad de las bombas del sistema de reinyección de agua del ZPF.

Bomba	Parámetro de forma Beta ( $\beta$ )	Parámetro de escala ( $\eta$ )	Tiempo medio entre fallas (MTBF)	Distribución que cumple su Confiabilidad
P-1501A	1.37	1350.2	1234.51	Weibull
P-1501B	1.46	1504.9	1362.78	Weibull
P-1501C	0.995	670.23	671.81	Weibull
P-1501D	0.789	104.89	1197.31	Weibull
P-1501E	0.91	1287.51	1346.81	Weibull

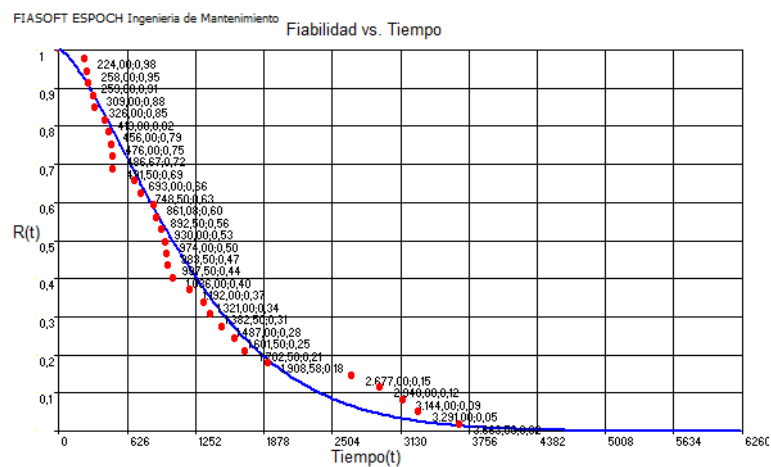
Fuente: Autor

Para la confiabilidad de cada una de las bombas del sistema de reinyección de agua, en el Capítulo 3 se obtuvo su ecuación, ya que la confiabilidad es un valor que depende del tiempo. Para la confiabilidad del sistema total de reinyección de agua se realizó un análisis del conjunto de bombas; las bombas P-1501A, P-1501B, P-1501C, P-1501D y P-1501E tienen una disposición en paralelo.

## 4.2. Curvas de los índices de Confiabilidad

Mediante el software FIASOFT se comprobó los parámetros de la fiabilidad de cada una de las bombas en el capítulo 3. Como resultados también se obtuvo los gráficos de los índices de fiabilidad de cada una. Es así que la Fiabilidad, Desconfiabilidad, la densidad de la probabilidad de falla y la tasa de falla, se graficaron en función del tiempo.

### 4.2.1. Curvas de índices de confiabilidad de la bomba P-1501A



**Figura 0-1.** Fiabilidad de la bomba P-1501A.

**Fuente:** FIASOFT-Autor

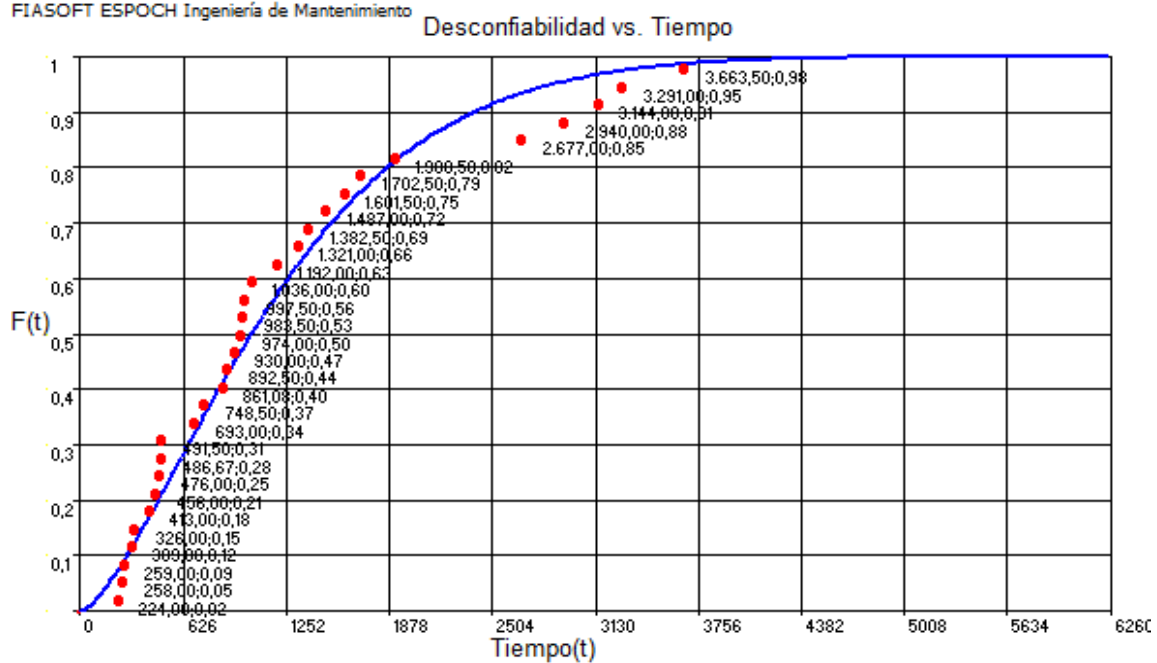
**Tabla 4-2.** Confiabilidad de las bombas y del sistema de reinyección de agua del ZPF..

T-To		P-1501A	P-1501B	P-1501E	P-1501C	P-1501D	CONFIABILIDAD DEL SISTEMA
		R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	
		FUNCION DE CONFIABILIDAD	FUNCION DE CONFIABILIDAD	FUNCION DE CONFIABILIDAD	FUNCION DE CONFIABILIDAD	FUNCION DE CONFIABILIDAD	
1	0	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
2	0,02	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	99,98%	100,00%
3	0,04	100,00%	100,00%	99,99%	99,99%	99,97%	100,00%
4	0,06	100,00%	100,00%	99,99%	99,99%	99,95%	100,00%
5	0,08	100,00%	100,00%	99,99%	99,99%	99,94%	100,00%
6	1	99,99%	100,00%	99,85%	99,85%	99,59%	100,00%
7	5	99,95%	99,97%	99,36%	99,24%	98,53%	100,00%
8	10	99,88%	99,93%	98,80%	98,49%	97,48%	100,00%
9	15	99,79%	99,88%	98,28%	97,74%	96,55%	100,00%
10	20	99,69%	99,81%	97,77%	97,01%	95,69%	100,00%
11	25	99,58%	99,74%	97,27%	96,28%	94,88%	100,00%
12	30	99,46%	99,66%	96,78%	95,56%	94,11%	100,00%
13	35	99,34%	99,58%	96,31%	94,84%	93,38%	100,00%
14	40	99,21%	99,49%	95,84%	94,13%	92,67%	100,00%
15	45	99,07%	99,39%	95,38%	93,42%	91,98%	100,00%
16	50	98,92%	99,29%	94,93%	92,72%	91,32%	100,00%

17	100	97,23%	98,08%	90,69%	86,02%	85,48%	100,00%
18	150	95,22%	96,57%	86,82%	79,81%	80,57%	100,00%
19	200	92,99%	94,85%	83,22%	74,07%	76,25%	100,00%
20	250	90,60%	92,95%	79,85%	68,74%	72,38%	99,99%
21	300	88,09%	90,92%	76,67%	63,80%	68,85%	99,97%
22	350	85,50%	88,79%	73,66%	59,22%	65,60%	99,94%
23	400	82,85%	86,56%	70,81%	54,97%	62,60%	99,89%
24	450	80,15%	84,27%	68,10%	51,03%	59,81%	99,80%
25	500	77,44%	81,93%	65,52%	47,37%	57,20%	99,68%
26	550	74,72%	79,54%	63,06%	43,98%	54,76%	99,52%
27	600	72,01%	77,14%	60,70%	40,83%	52,47%	99,29%
28	650	69,32%	74,72%	58,46%	37,91%	50,30%	99,01%
29	700	66,65%	72,29%	56,31%	35,20%	48,27%	98,65%
30	750	64,01%	69,87%	54,25%	32,68%	46,34%	98,21%
31	800	61,42%	67,45%	52,28%	30,35%	44,51%	97,68%
32	850	58,88%	65,06%	50,39%	28,18%	42,78%	97,07%
33	900	56,39%	62,69%	48,58%	26,16%	41,14%	96,36%
34	950	53,95%	60,35%	46,85%	24,29%	39,58%	95,56%
35	1000	51,57%	58,05%	45,18%	22,56%	38,09%	94,66%
36	2000	18,00%	22,68%	22,47%	5,14%	18,87%	62,17%
37	3000	5,02%	6,93%	11,54%	1,18%	10,06%	30,50%
38	4000	1,18%	1,74%	6,05%	0,27%	5,60%	14,12%
39	5000	0,24%	0,37%	3,22%	0,06%	3,22%	6,96%

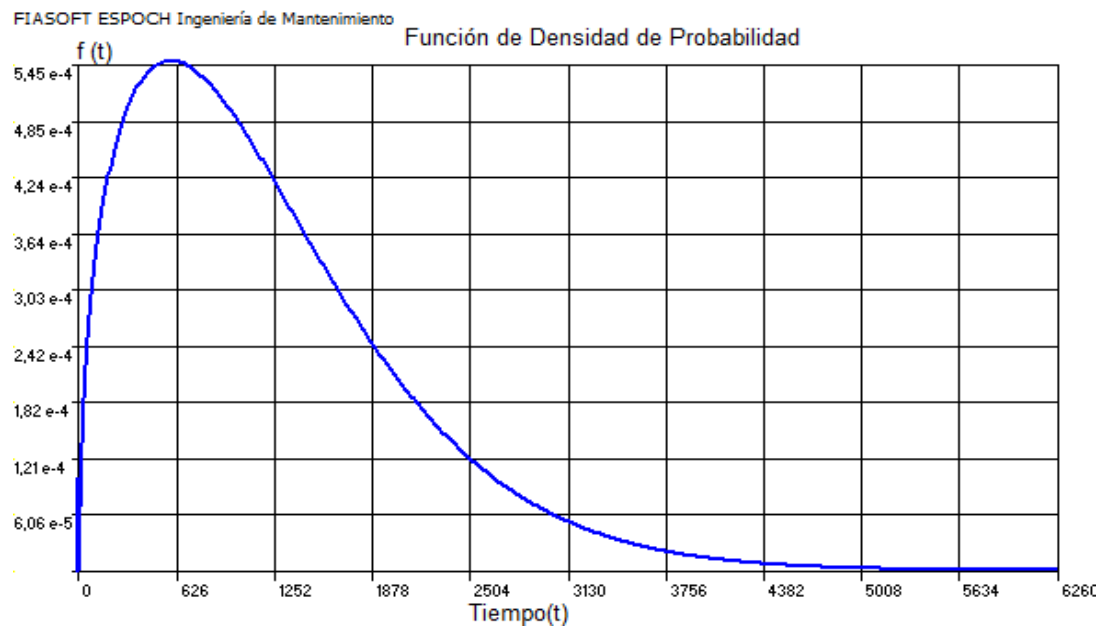
40	6000	0,04%	0,07%	1,73%	0,01%	1,89%	3,71%
<b>Fuente:</b> Autor							





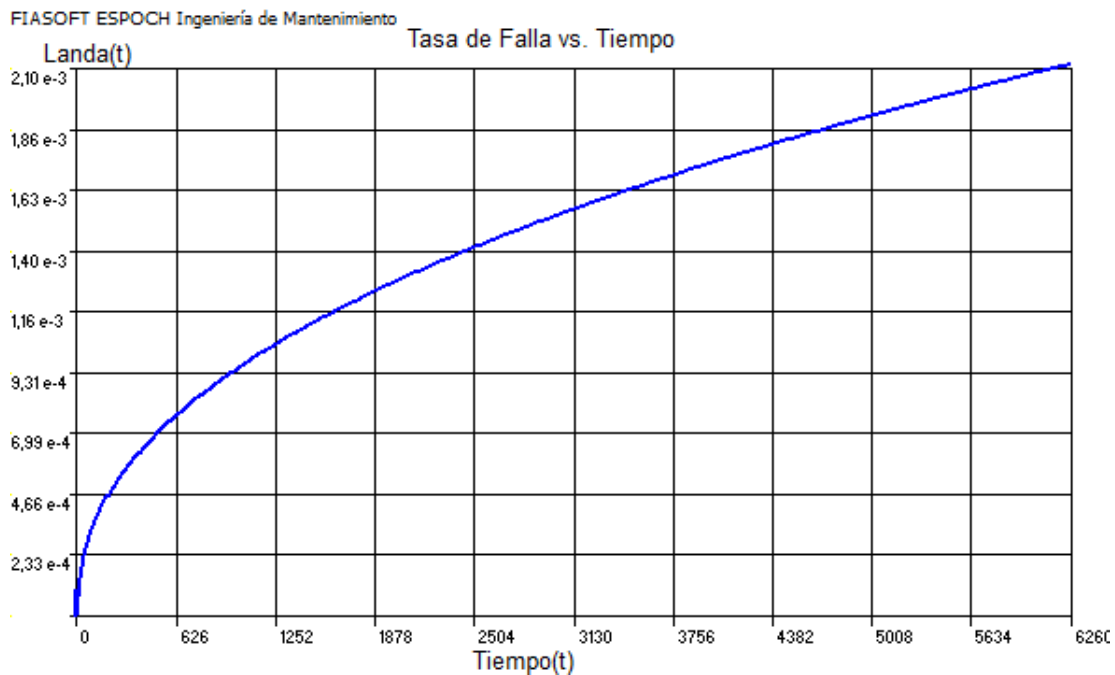
**Figura 4-2.** Desconfiabilidad de la bomba P-1501A.

**Fuente:** FIASOFT-Autor



**Figura 4-3.** Densidad de probabilidad de falla de la bomba P-1501A.

**Fuente:** FIASOFT-Autor



**Figura 4-4.** Tasa de falla de la bomba P-1501A.

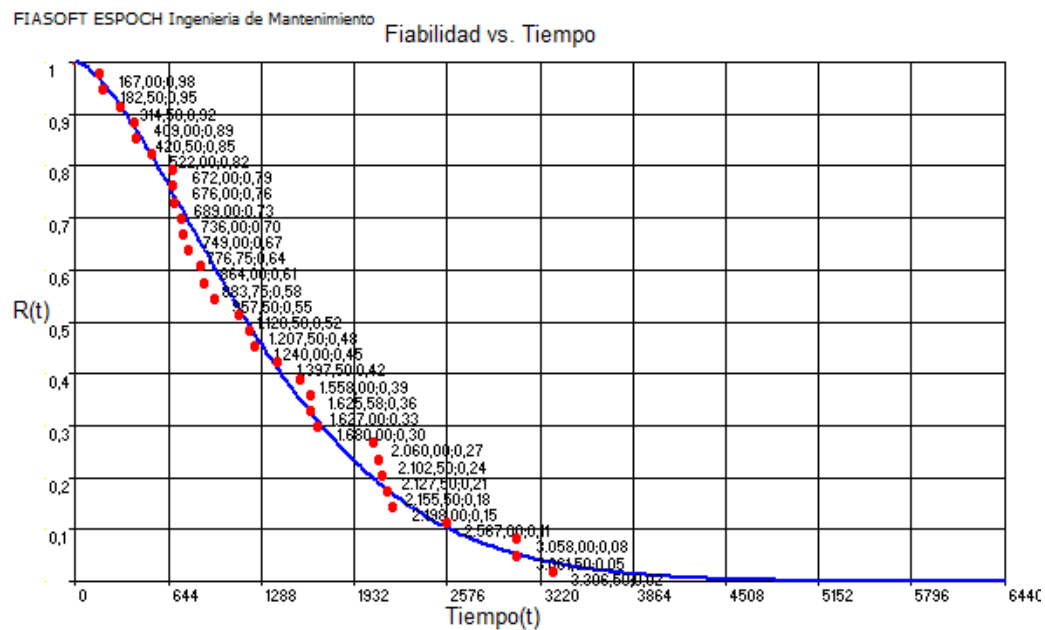
**Fuente:** FIASOFT-Autor

Para la bomba P-1501A se obtuvo un parámetro de forma Beta,  $\beta = 1.373$ , este parámetro indica que se encuentra en la etapa I de la fase III de la curva de Davies. Estas fallas se fundamentan en el desgaste de los elementos, envejecimiento o la pérdida de funcionalidad, se generan por el tiempo, son causadas por el uso. La bomba se encuentra en la fase conocida como la de envejecimiento o desgaste. Este hecho se evidencia en los datos de la Tabla 1, donde se muestra que el cambio de sellos mecánicos fue una de las tareas que más impacto tuvo en los down time, esto acompañado por mejoras operativas de la unidad. También es de notar la gran cantidad de orden de trabajo para limpieza de strainer en succión, si bien se tiene dos strainers (uno respaldo del otro) han provocado muy bajas succiones hasta apagar la bomba.

Para el parámetro de escala de la bomba P-1501A Eta,  $\eta$  es el valor determinante para fijar la vida útil del componente; a sus 1350.2 horas se espera que falle con una seguridad del 63.2%, la confiabilidad de la bomba a las 1350.2 horas es del 36.8%, independientemente del valor de  $\beta$ .

Para la bomba P-1501A, el MTBF es de 1234.51 horas, este es el periodo recomendado para realizar mantenimiento preventivo. El período de tiempo entre mantenimientos no debe ir más allá de las 1234.51 horas entre mantenimientos preventivos, en ese instante la bomba tendrá una confiabilidad del 41.3%, se espera que exista un 58.7% de posibilidades de falla. A las 1033.7 horas existe el 50% de posibilidades que falle o no falle la bomba P-1501A.

#### 4.2.2. Curvas de índices de confiabilidad de la bomba P-1501B



**Figura 4-5.** Fiabilidad de la bomba P-1501B.

**Fuente:** FIASOFT-Autor

## Desconfiabilidad vs. Tiempo

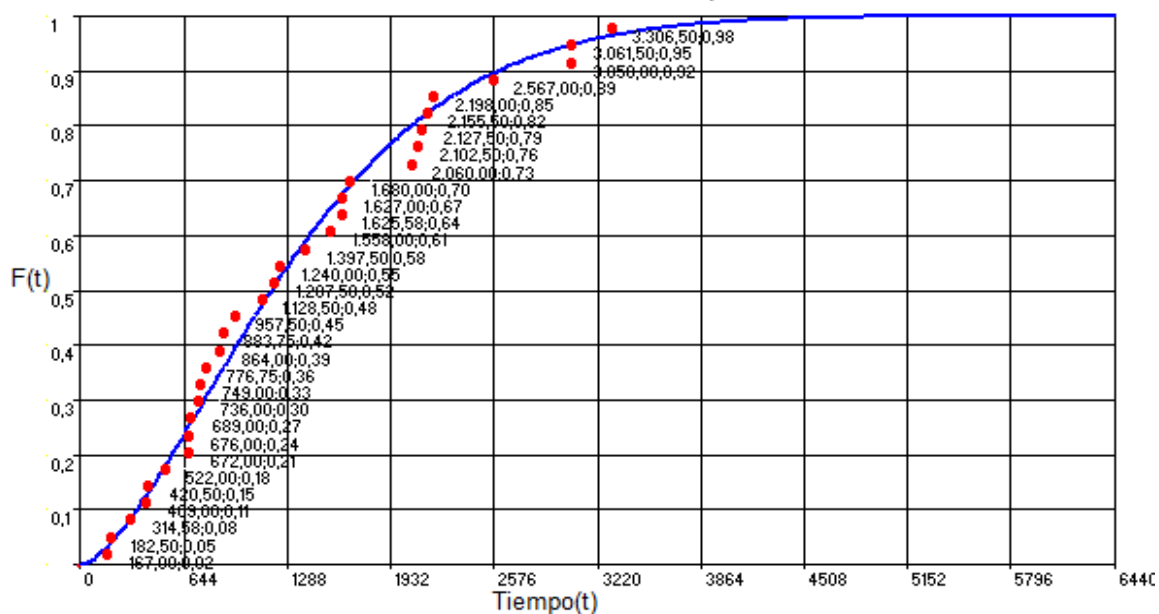


Figura 4-6. Desconfiabilidad de la bomba P-1501B.

Fuente: FIASOFT-Autor

## Función de Densidad de Probabilidad

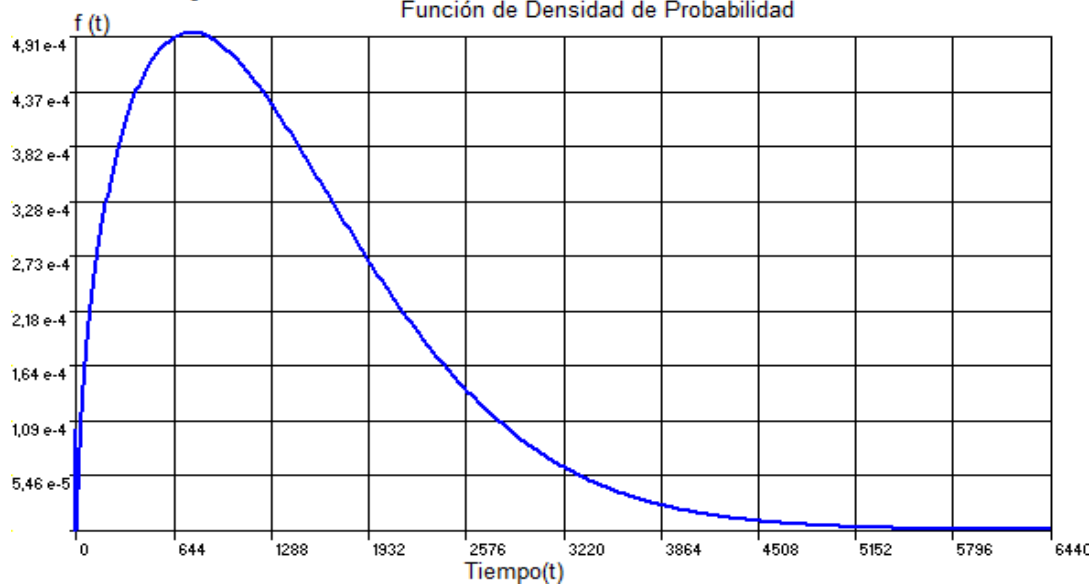
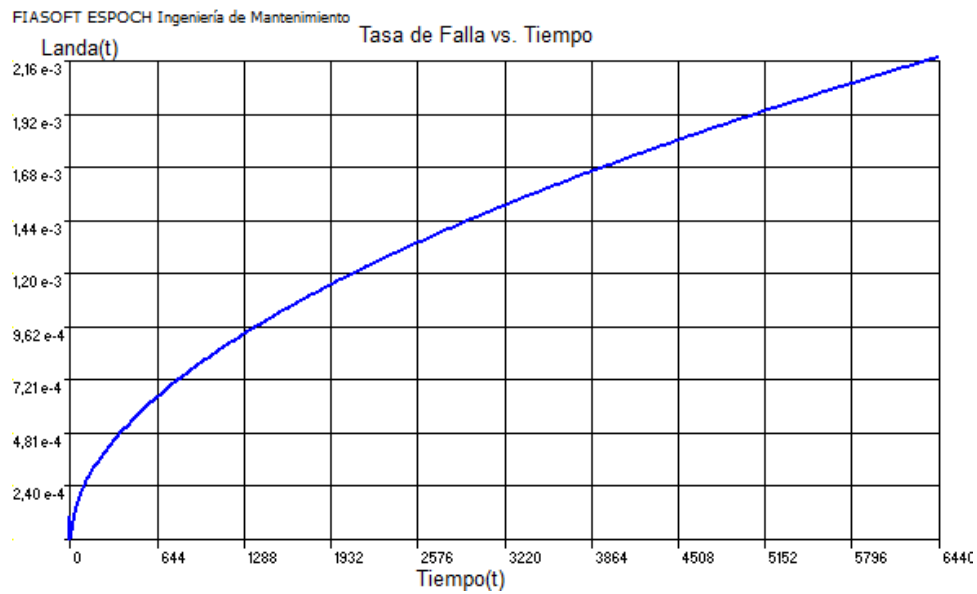


Figura 4-7. Densidad de probabilidad de falla de la bomba P-1501B.

Fuente: FIASOFT-Autor



**Figura 4-8.** Tasa de falla de la bomba P-1501B.

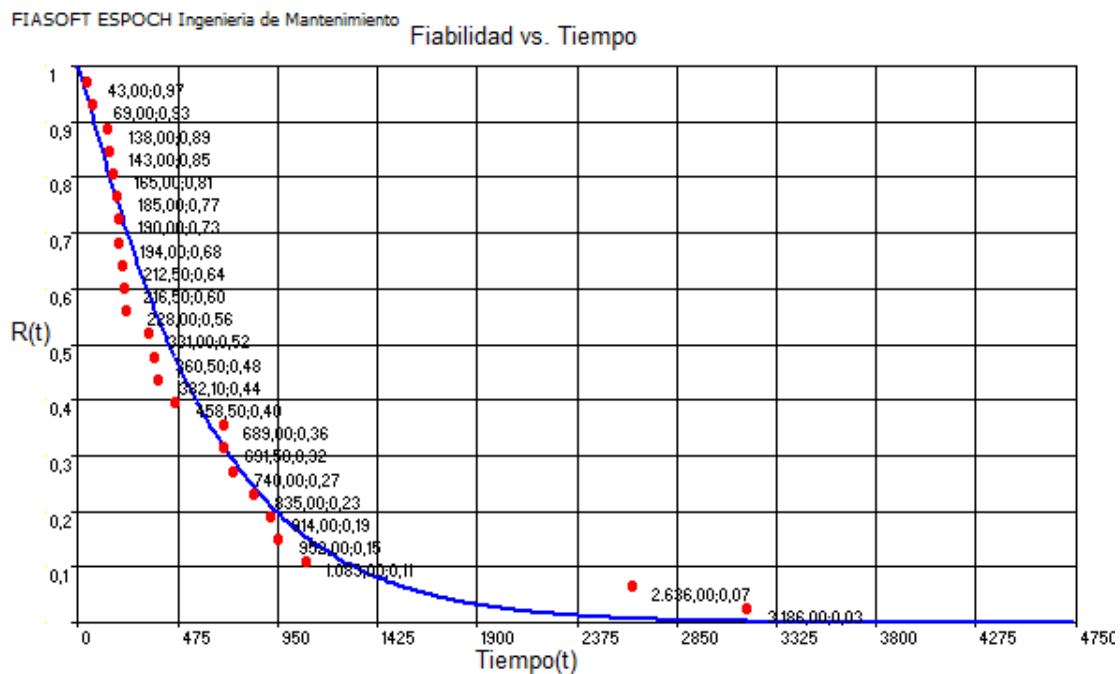
**Fuente:** FIASOFT-Autor

Para la bomba P-1501B se obtuvo un parámetro de forma Beta,  $\beta = 1.448$ , este parámetro indica que se encuentra en la etapa I de la fase III de la curva de Davies. Estas fallas se fundamentan en el desgaste de los elementos, envejecimiento o la pérdida de funcionalidad, se generan por el tiempo, son causadas por el uso. La bomba se encuentra en la fase conocida como la de envejecimiento o desgaste. En el Anexo 02 se evidencia que las ordenes de trabajo de la bomba P-1501B tienen un alto down time por mejoras operativas; sin embargo si destaca el cambio de cojinetes, revisión de juego axial, corrección de liqueos y atascamientos de válvulas que son efectos del desgaste de elementos rotativos.

Para el parámetro de escala Eta de la bomba P-1501B,  $\eta$  es el valor determinante para fijar la vida útil del componente; a sus 1522.81 horas se espera que falle con una seguridad del 63.2%, es decir la confiabilidad de la bomba a las 1522.81 horas es del 36.8%, independientemente del valor de  $\beta$ .

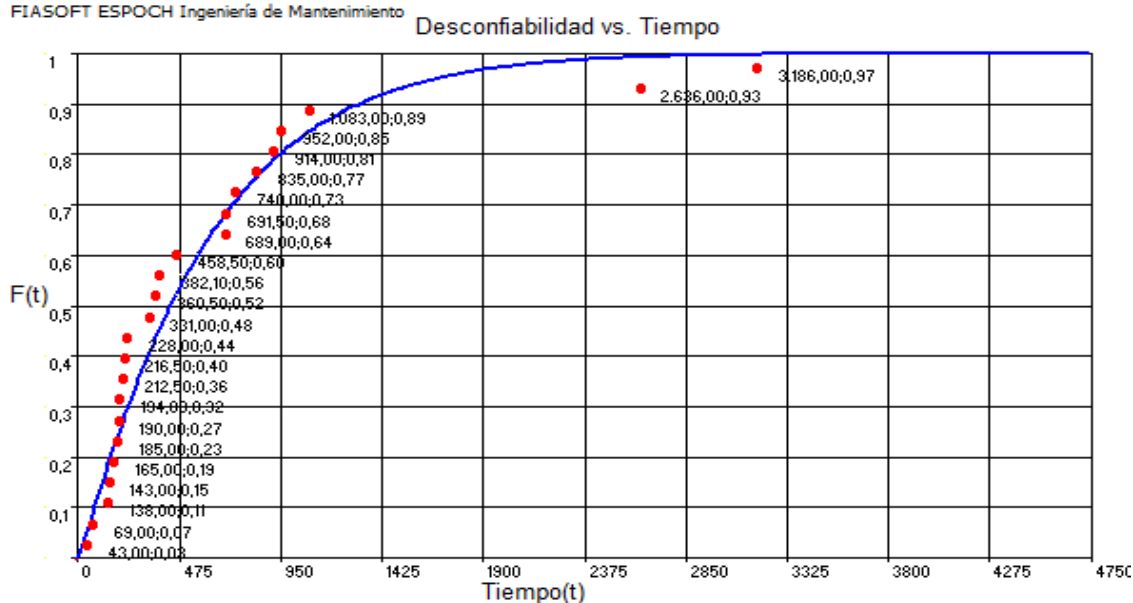
Para la bomba P-1501 B, el MTBF es de 1381.09 horas, este es el periodo recomendado para realizar mantenimiento preventivo. El período de tiempo no debe ir más allá de las 1381.09 horas entre mantenimientos preventivos, en ese instante la bomba tendrá una confiabilidad del 41.9%, se espera que un 58.1% de posibilidades de falla. A las 1182.5 horas existe el 50% de posibilidades que falle o no falle la bomba P-1501B.

#### 4.2.3. Curvas de índices de confiabilidad de la bomba P-1501C



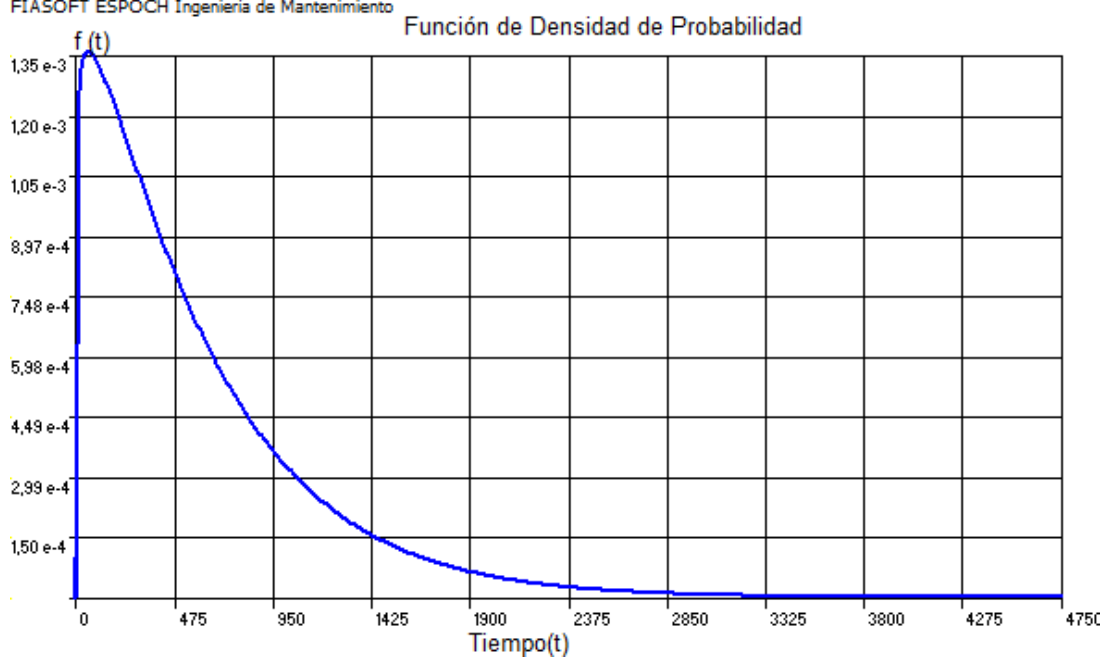
**Figura 4-9.** Fiabilidad de la bomba P-150C.

**Fuente:** FIASOFT-Autor



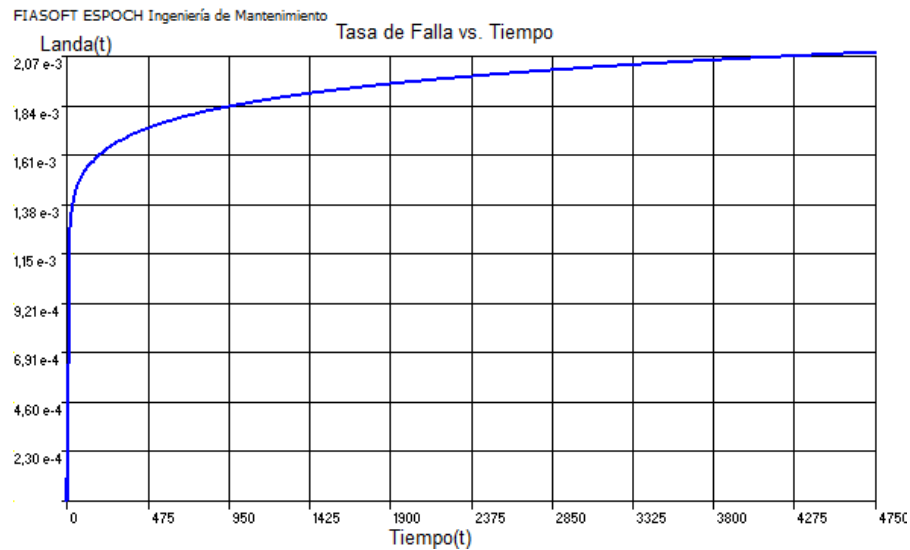
**Figura 4-10.** Desconfiabilidad de la bomba P-1501C.

**Fuente:** FIASOFT-Autor



**Figura 4-11.** Densidad de probabilidad de falla de la bomba P-1501C.

**Fuente:** FIASOFT-Autor



**Figura 4-12.** Tasa de falla de la bomba P-1501C.

**Fuente:** FIASOFT-Autor

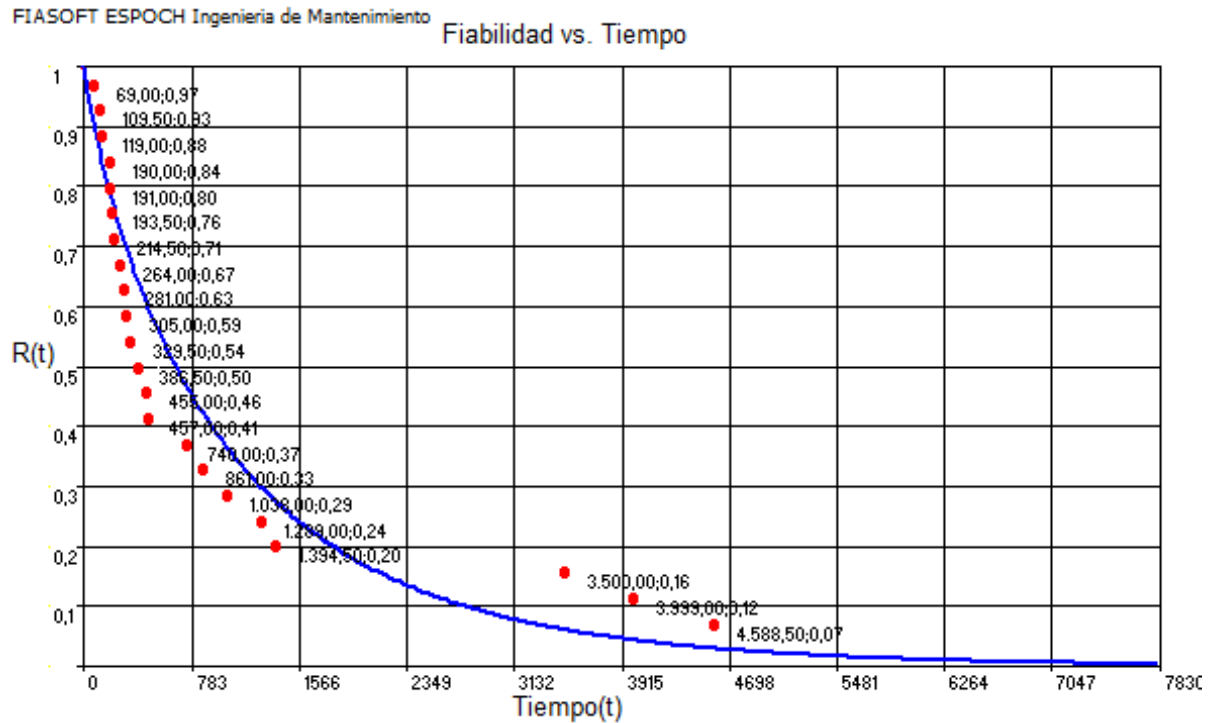
Para la bomba P-1501C se obtuvo un parámetro de forma Beta,  $\beta = 0,995$ , este parámetro indica que se encuentra en la fase II de la curva de Davies, de madurez o de vida útil. Las fallas se originan básicamente por operación indebida de los equipos, sobre carga de la capacidad de producción, cambios constantes en las condiciones de funcionamiento. Este hecho se verifica en el Anexo 03 donde las orden de trabajo indican un alto número de limpieza de strainer (la bomba P-1501C cuenta contaba con un solo strainer hasta hace pocos meses atrás) cambio de válvulas check (el tipo de válvulas y su clase ha sido modificado).

Para el parámetro de escala Eta de la bomba P-1501C,  $\eta$  es el valor determinante para fijar la vida útil del componente; a sus 670.23 horas se espera que falle con una seguridad del 63.2%, es decir la confiabilidad de la bomba a las 670.23 horas es del 36.8%, independientemente del valor de  $\beta$ . Para la bomba P-1501 C, el tiempo medio entre fallas es de 671.81 horas, este es el periodo recomendado para realizar mantenimiento preventivo. Es decir mediante los cálculos anteriores se puede indicar que el período de tiempo no debe ir más allá de las 671.81 horas entre mantenimientos preventivos, en ese instante la bomba tendrá una confiabilidad del 36.7%, se espera



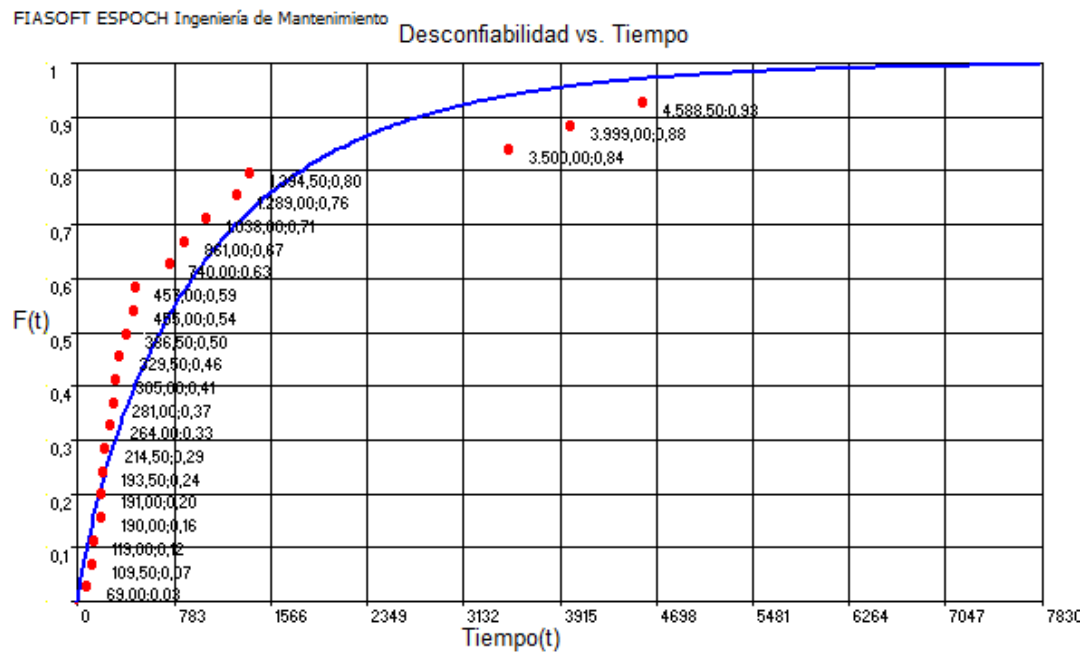
que un 63.3% de posibilidades de falla. A las 463 horas existe el 50% de posibilidades que falle o no falle la bomba P-1501C.

#### 4.2.4. Curvas de índices de confiabilidad de la bomba P-1501D



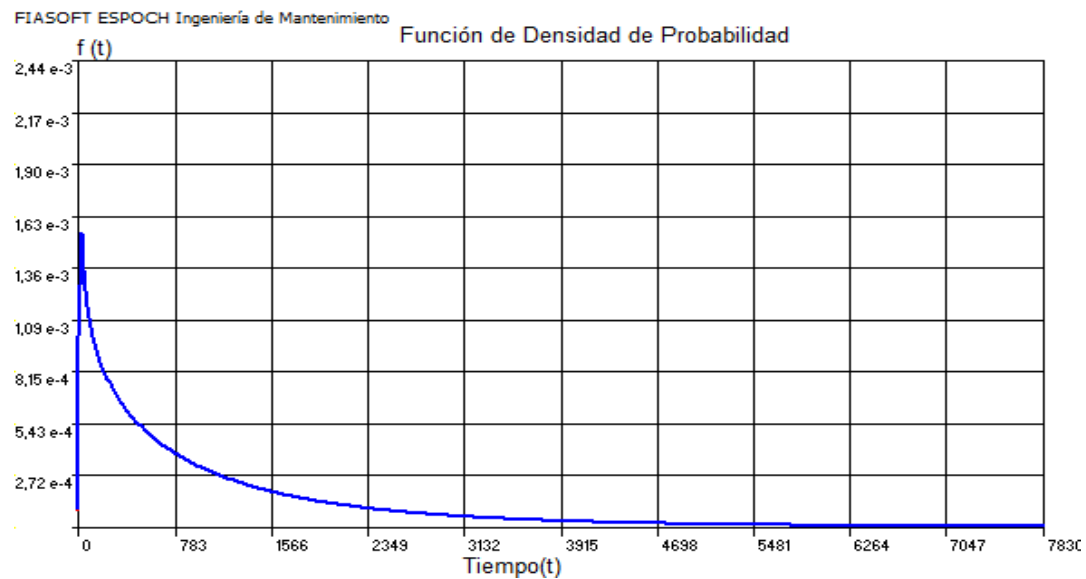
**Figura 4-13.** Fiabilidad de la bomba P-1501D.

Fuente: FIASOFT-Autor



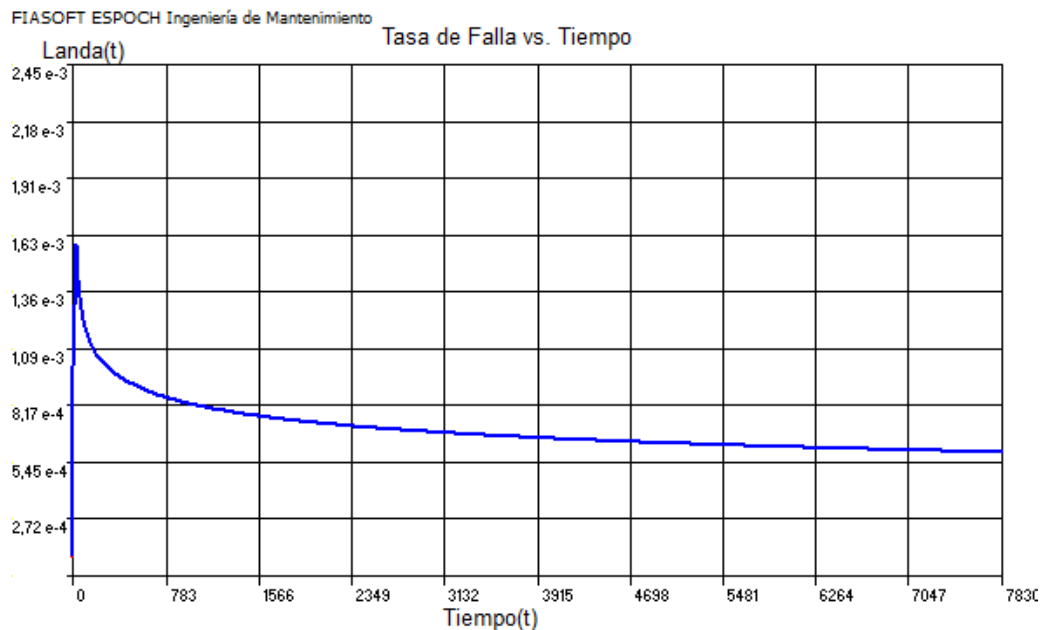
**Figura 0-14.** Desconfiabilidad de la bomba P-1501D.

**Fuente:** FIASOFT-Autor



**Figura 0-15.** Densidad de probabilidad de falla de la bomba P-1501D.

**Fuente:** FIASOFT-Autor



**Figura 0-16.** Tasa de falla de la bomba P-1501D.

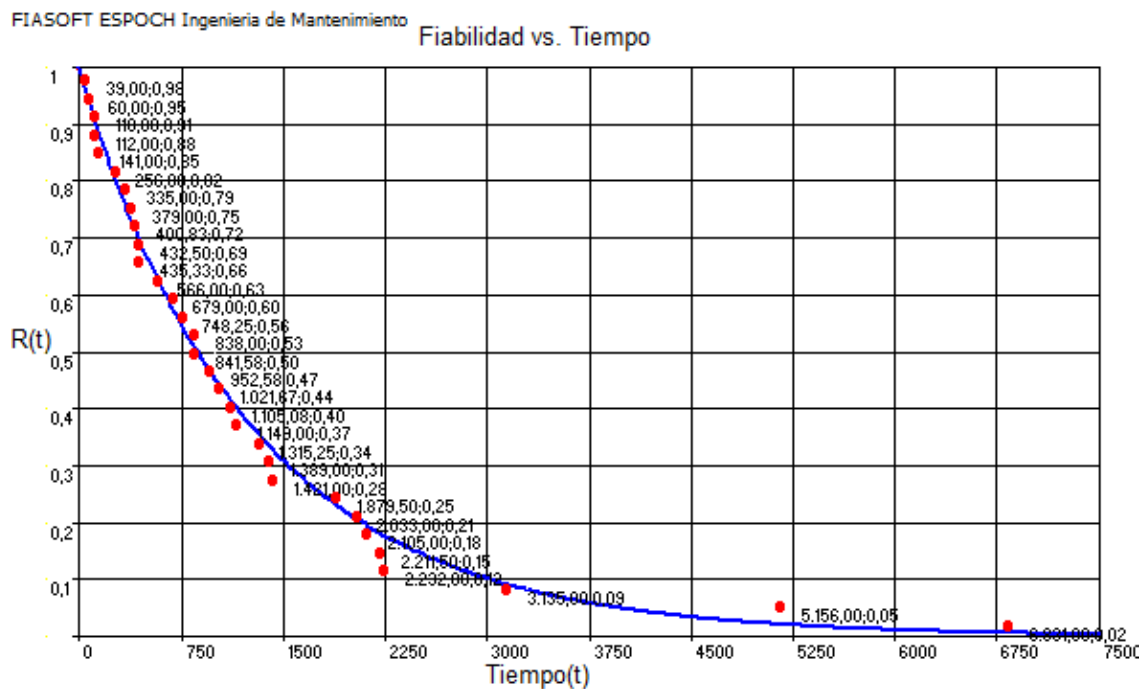
**Fuente:** FIASOFT-Autor

Para la bomba P-1501D se obtuvo un parámetro de forma Beta,  $\beta = 0,804$ , este parámetro indica que se encuentra en la fase I de la curva de Davies, de rodaje o de mortalidad infantil. Las fallas se deben normalmente a defectos de materiales, diseños inadecuados, montajes deficientes, mantenimientos incorrectos, calidad deficiente en elementos y repuestos. En el Anexo 04 se muestra que el problema de limpieza de strainer es recurrente, el contar con un solo strainer fue un error de diseño. Adicional la rotura de eje de bomba (fallo de material) ha provocada down times elevados.

Para el parámetro de escala Eta de la bomba P-1501D,  $\eta$  es el valor determinante para fijar la vida útil del componente; a sus 1016.74 horas se espera que falle con una seguridad del 63.2%, es decir la confiabilidad de la bomba a las 1016.74 horas es del 36.8%, independientemente del valor de  $\beta$ .

Para la bomba P-1501 D, el MTBF es de 1147.2 horas, este es el periodo recomendado para realizar mantenimiento preventivo. El período de tiempo no debe ir más allá de las 1147.2 horas entre mantenimientos preventivos, en ese instante la bomba tendrá una confiabilidad del 34.11%, se espera que un 65.89% de posibilidades de falla. A las 657 horas existe el 50% de posibilidades que falle o no falle la bomba P-1501D.

#### 4.2.5. Curvas de índices de confiabilidad de la bomba P-1501E



**Figura 0-17.** Fiabilidad de la bomba P-1501E.

**Fuente:** FIASOFT-Autor

## Desconfiabilidad vs. Tiempo

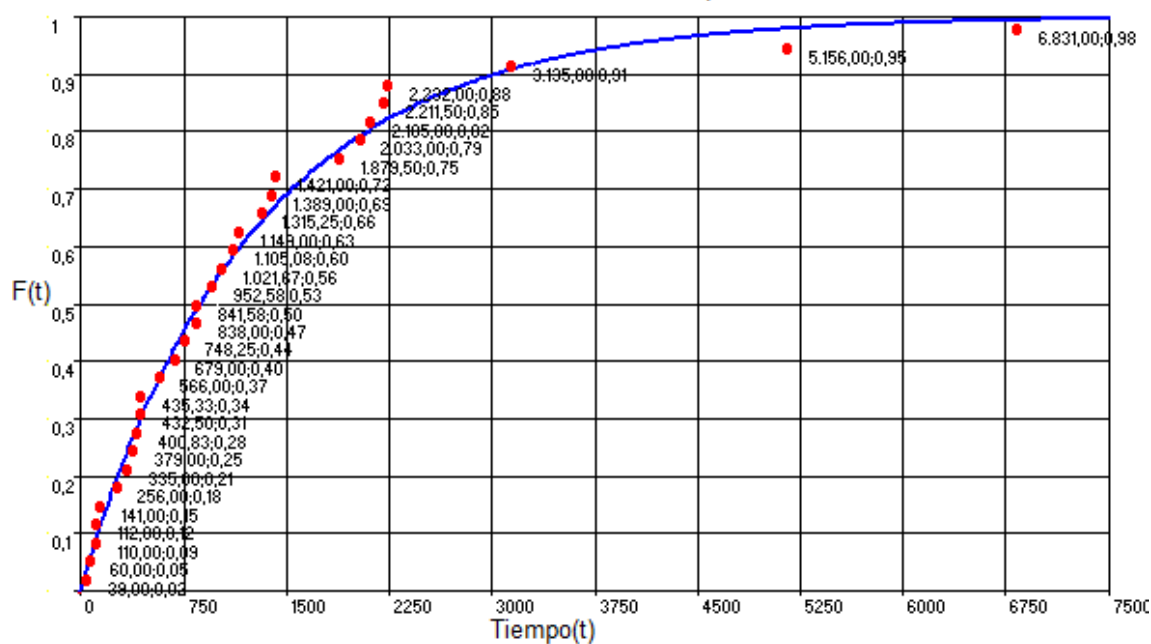


Figura 4-18. Desconfiabilidad de la bomba P-1501E.

Fuente: FIASOFT-Autor

## Función de Densidad de Probabilidad

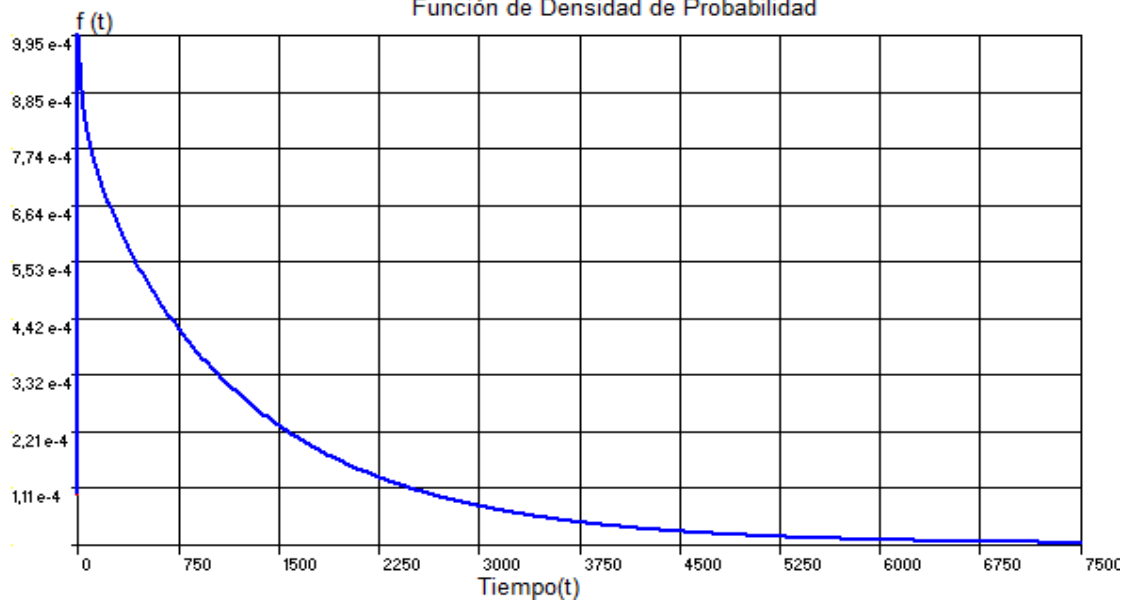
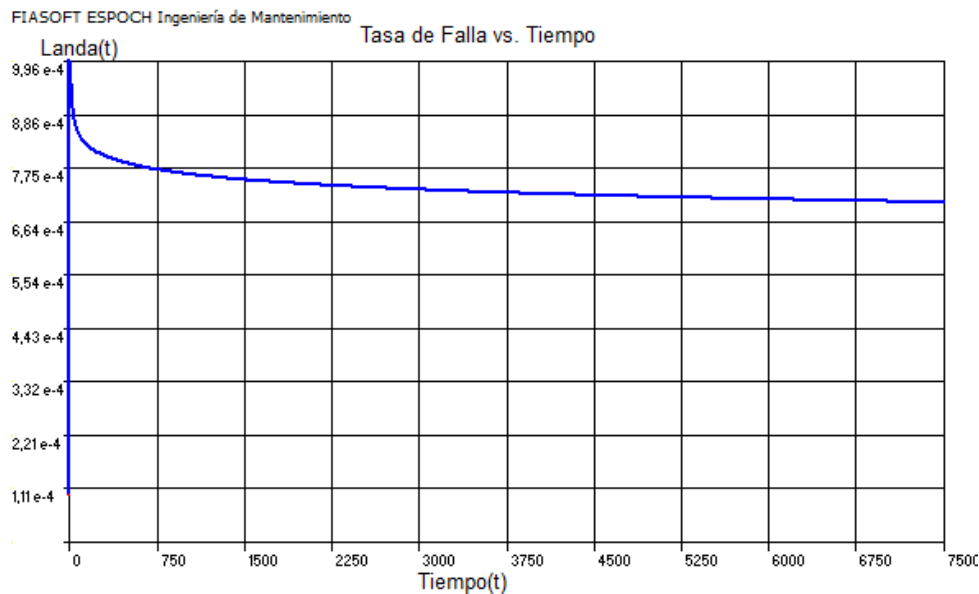


Figura 4-19. Densidad de probabilidad de falla de la bomba P-1501E.

Fuente: FIASOFT-Autor



**Figura 0-20.** Tasa de falla de la bomba P-1501E. **Fuente:** FIASOFT-Autor

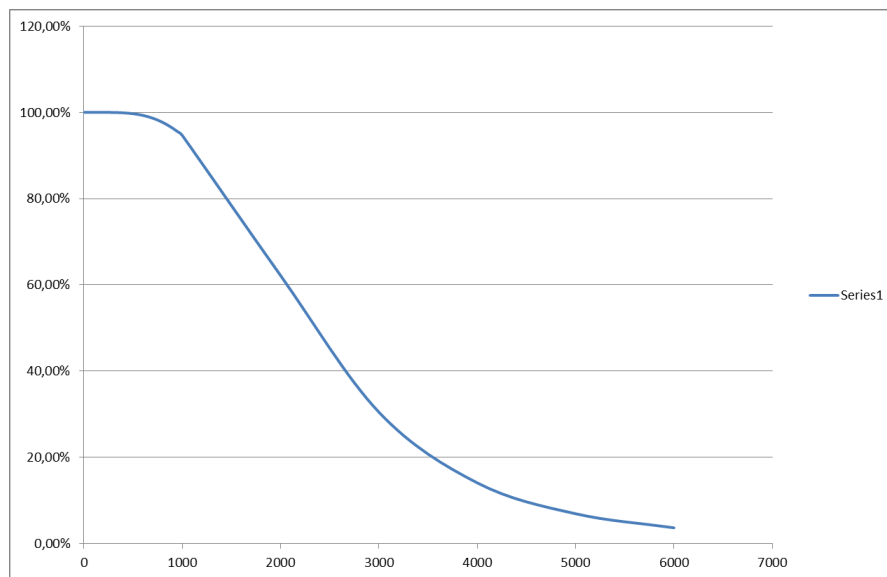
Para la bomba P-1501E se obtuvo un parámetro de forma Beta,  $\beta = 0,91$ , este parámetro indica que se encuentra en la fase I de la curva de Davies, de rodaje o de mortalidad infantil. Las fallas se deben normalmente a defectos de materiales, diseños inadecuados, montajes deficientes, mantenimientos incorrectos, calidad deficiente en elementos y repuestos. Es evidente que el mayor problema de la bomba P-1501E fue producto del mal diseño de su tecnología de ajuste (rotura de cuerpo) provocó un down time elevado acompañado de problemas de alineación posteriores. Su montaje fue deficiente y encontrar la modificación adecuada conllevó tiempo y ensayos de prueba y error.

Para el parámetro de escala Eta de la bomba P-1501E,  $\eta$  es el valor determinante para fijar la vida útil del componente; a sus 1287.51 horas se espera que falle con una seguridad del 63.2%, es decir la confiabilidad de la bomba a las 1287.51 horas es del 36.8%, independientemente del valor de  $\beta$ .

Para la bomba P-1501 E, el tiempo medio entre fallas es de 1346.81 horas, este es el periodo recomendado para realizar mantenimiento preventivo. Es decir mediante los cálculos anteriores se

puede indicar que el período de tiempo no debe ir más allá de las 1346.81 horas entre mantenimientos preventivos, en ese instante la bomba tendrá una confiabilidad del 35.28%, se espera que un 64,72% de posibilidades de falla. A las 861 horas existe el 50% de posibilidades que falle o no falle la bomba P-1501E.

#### 4.2.6. Curva de índice de confiabilidad del sistema de reinyección de agua



**Figura 4-21.** Curva de confiabilidad del sistema de reinyección de agua ZPF Petroamazonas EP.

**Fuente:** Autor

La curva de confiabilidad del sistema de reinyección de agua cuenta con una primera zona constante donde su fiabilidad se mantiene en 100% esto hasta alrededor de un periodo de tiempo de 1000 horas. Esto pronostica básicamente que el sistema no fallará durante 1000 horas (42 días). En el periodo de 1000 horas hasta 2000 horas es donde se pronuncia claramente una pérdida de confiabilidad del 33%, la fiabilidad decrece hasta un 62%. Es decir existe una probabilidad del 38% que falle el sistema. En el periodo de 2000 hasta 3000 horas, la confiabilidad disminuye desde el 30% hasta un 14%, existe una pérdida de fiabilidad de 16%. Existe una probabilidad del 84% de que falle el sistema. Finalmente de 3000 horas en adelante la fiabilidad decrece paulatinamente hasta su mínima expresión.

### 4.3. Parámetros e índices de Mantenibilidad

En el capítulo 3 se calculó y comprobó los parámetros de mantenibilidad para cada una de las bombas del sistema de reinyección de agua. A continuación se indica una tabla resumen de cada una de los parámetros de mantenibilidad de las bombas del sistema de reinyección de agua, entendiéndose como resultados de la investigación.

#### 4.3.1. Curvas de los índices de Mantenibilidad

Mediante el software RAM de Alberto Mora Gutierrez (2007) se comprobó los parámetros de la mantenibilidad de cada una de las bombas en el capítulo 3. Como resultados también se obtuvo los gráficos de los índices de Mantenibilidad de cada una. Es así que la Mantenibilidad y Densidad de Reparaciones, se graficaron en función del tiempo.

**Tabla 4-3.** Tabla de resultados de parámetros de mantenibilidad de las bombas del sistema de reinyección de agua del ZPF.

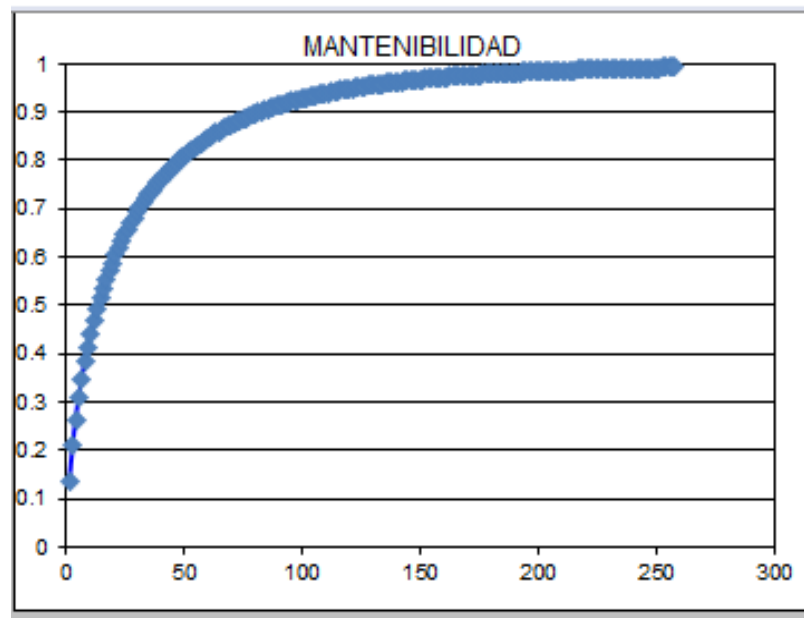
Bomba	Parámetro de forma Beta ( $\beta$ )	Parámetro de escala ( $\eta$ )	Tiempo medio entre fallas (MTBF)	Distribución que cumple su Confiabilidad
P-1501A	0.668	22.606	29.95	Weibull
P-1501B	1.679	1.7	23.67	LogNormal
P-1501C	1.014	0.8	3.66	LogNormal
P-1501D	1.785	1.2	12.79	LogNormal
P-1501E	0.5735	59.32	94.96	Weibull

Fuente: Autor



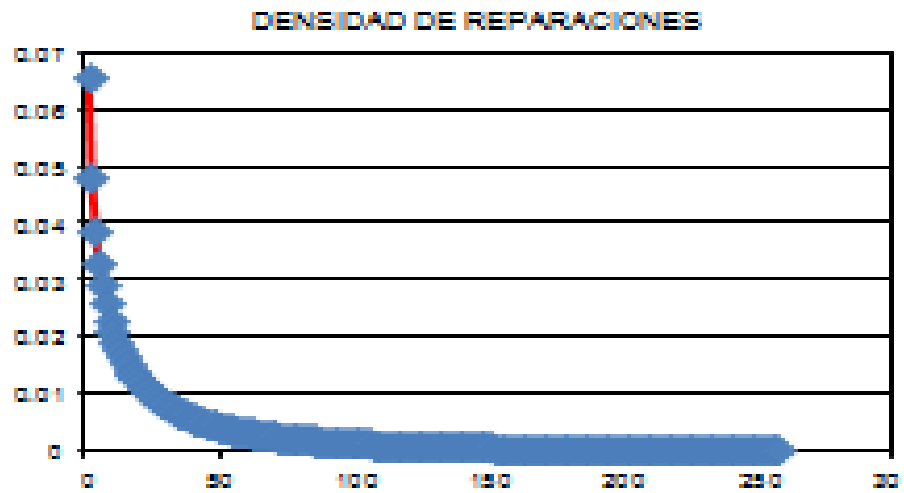
#### 4.3.2. *Curvas de índices de Mantenibilidad de la bomba P-1501A*

Para la bomba P-1501A toma un promedio de 29.95 horas salir de su acciones correctivas (MTTR), Siendo las tareas de modificación o de mejoras las que más tiempo tomaron (Implementación del sistema de alivio de presión, inserción de nuevo sistema de sellos y actualización de software de HMI)



**Figura 4-22.** Curva de Mantenibilidad de bomba P-1501A.

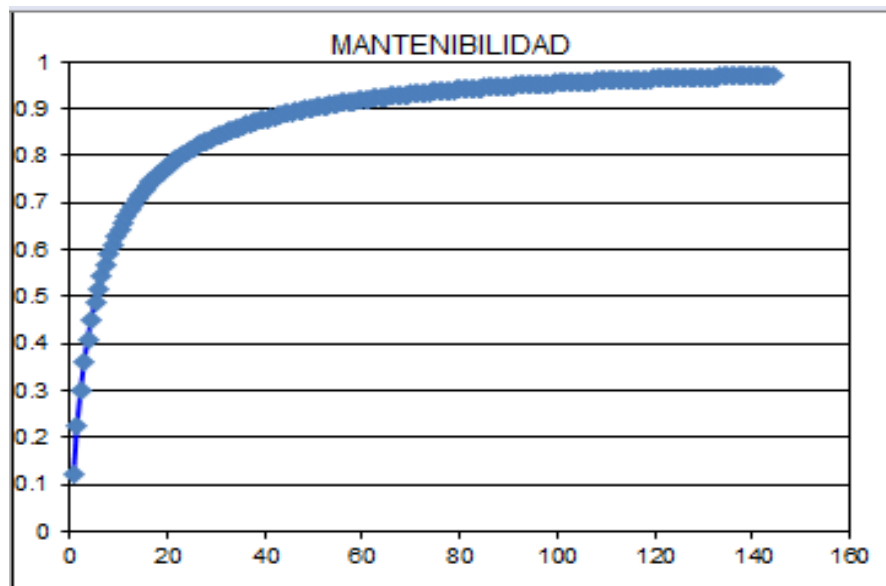
**Fuente:** Autor-Software RAM Mora 2007.



**Figura 4-23.** Densidad de Reparaciones de bomba P-1501A.

**Fuente:** Autor-Software RAM Mora 2007.

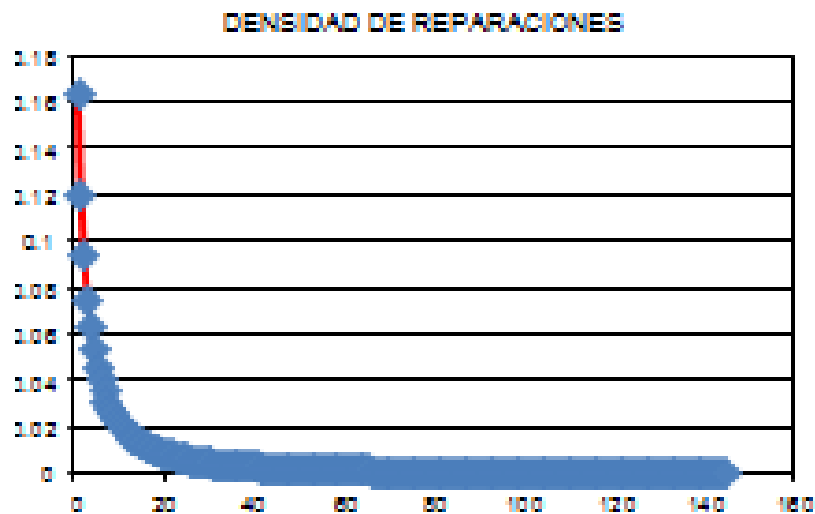
#### 4.3.3. *Curvas de índices de Mantenibilidad de la bomba P-1501B*



**Figura 4-24.** Curva de Mantenibilidad de bomba P-1501B.

**Fuente:** Autor-Software RAM Mora 2007.

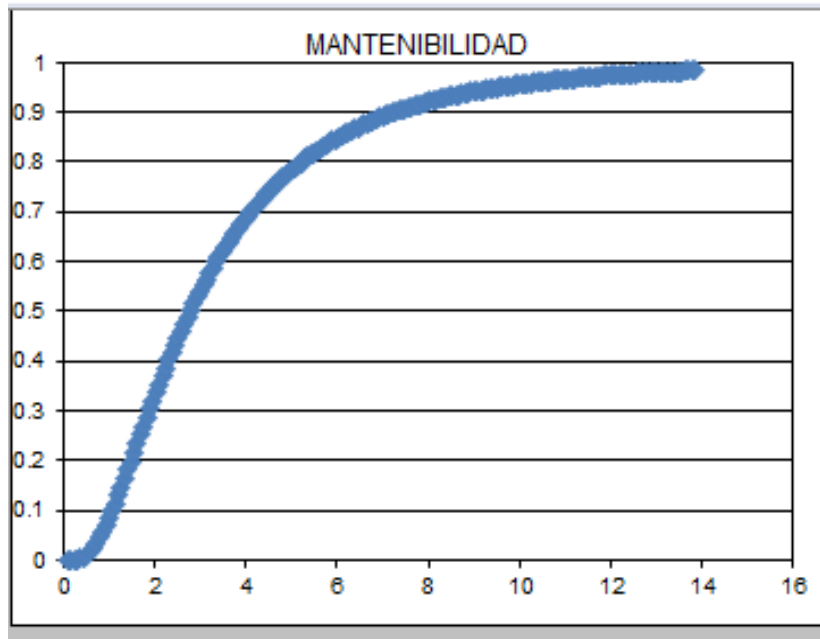
Para la segunda bomba P-1501B toma un promedio de 14.2 horas superar las tareas correctivas y poner a punto el sistema. Las tareas de mejora de sellos fueron las que más tiempo dejaron inhabilitada la bomba, adicional en este activo se tuvo un cambio de cojinetes que contribuye a su MTTR. Se debe recalcar que el menor promedio de down time puede deberse a las lecciones aprendidas con la primera unidad y aprovechar los tiempos generados por otras fallas para realizar tareas como actualización de software, disminuyendo así su down time)



**Figura 4-25.** Densidad de Reparaciones de bomba P-1501B.

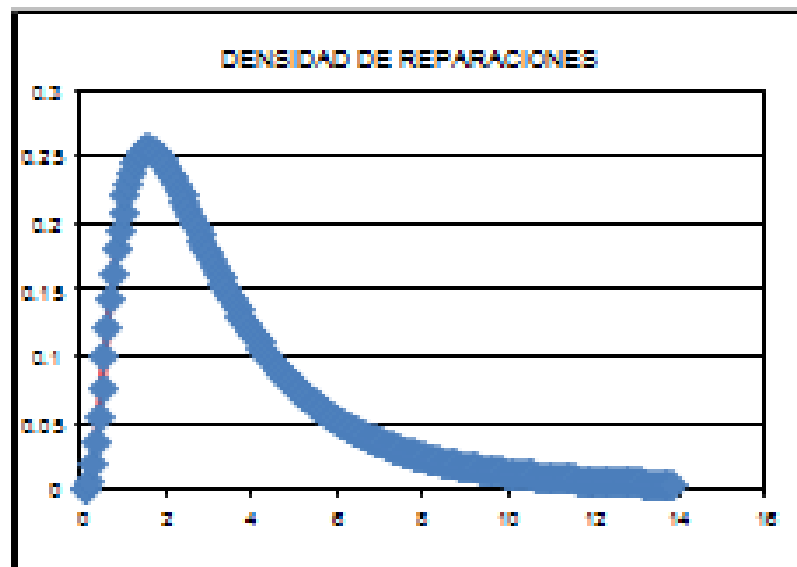
**Fuente:** Autor-Software RAM Mora 2007.

#### 4.3.4. Curvas de índices de Mantenibilidad de la bomba P-1501C



**Figura 4-26.** Curva de Mantenibilidad de bomba P-1501C.

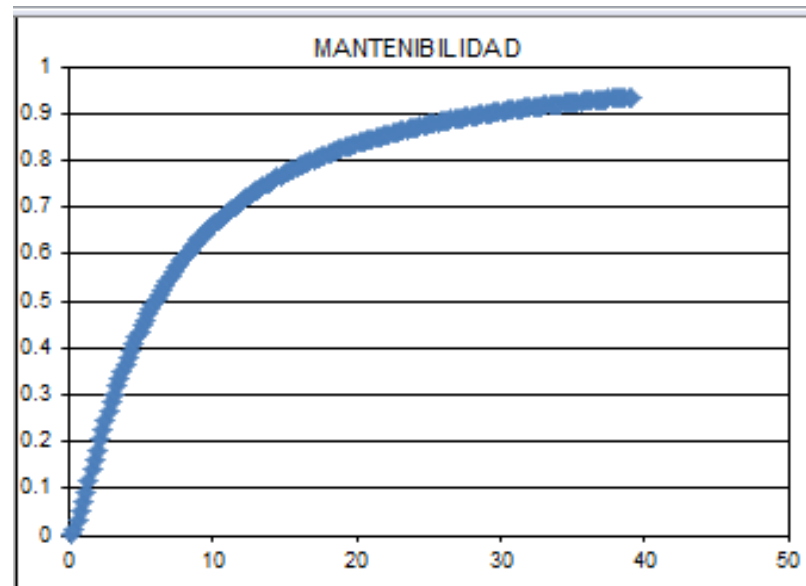
**Fuente:** Autor-Software RAM Mora 2007.



**Figura 4-27.** Densidad de Reparaciones de bomba P-1501B.

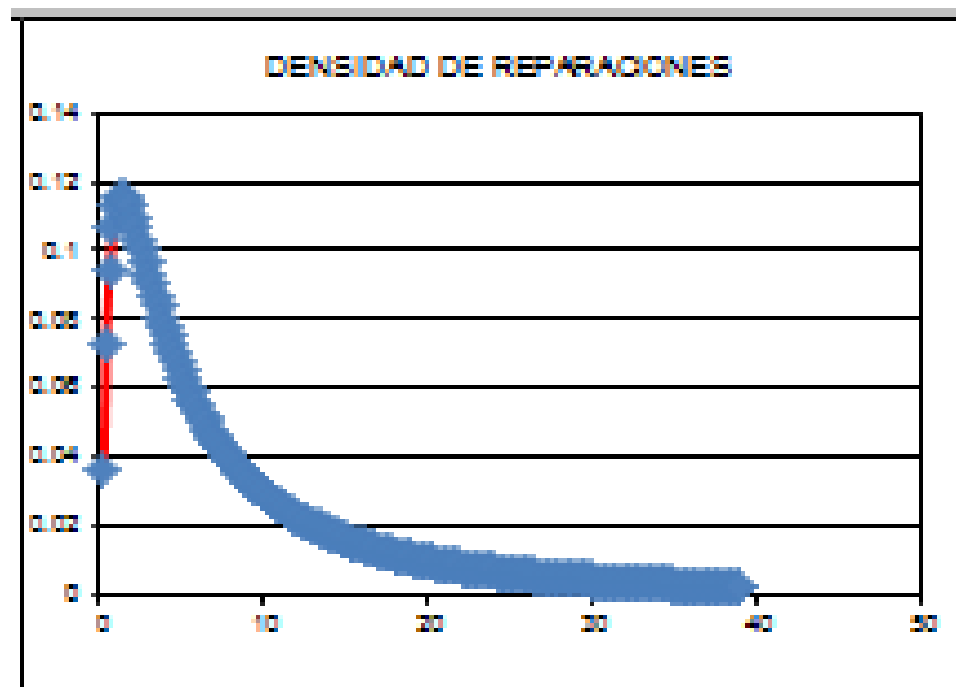
**Fuente:** Autor-Software RAM Mora 2007.

#### 4.3.5. Curvas de índices de Mantenibilidad de la bomba P-1501D



**Figura 4-28.** Curva de Mantenibilidad de bomba P-1501D.

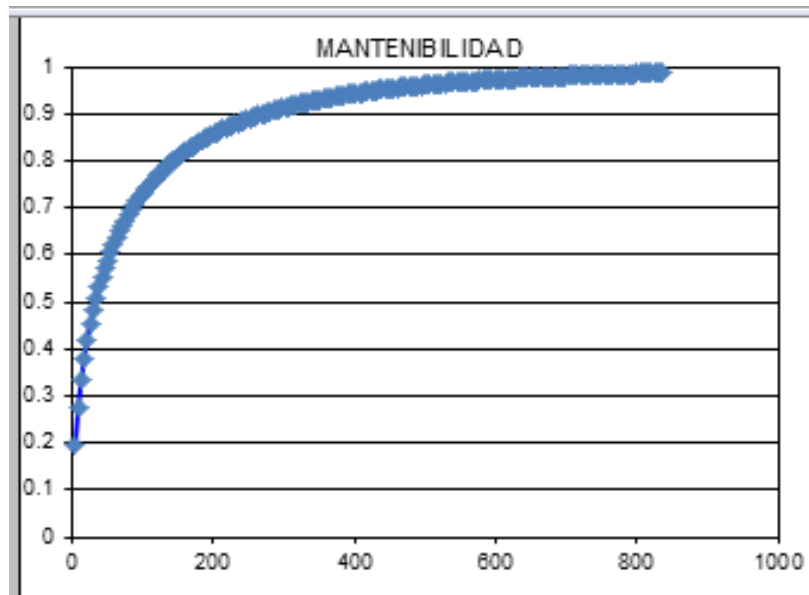
**Fuente:** Autor-Software RAM Mora 2007.



**Figura 0-29.** Densidad de Reparaciones de bomba P-1501D. **Fuente:** Autor-Software RAM Mora 2007.

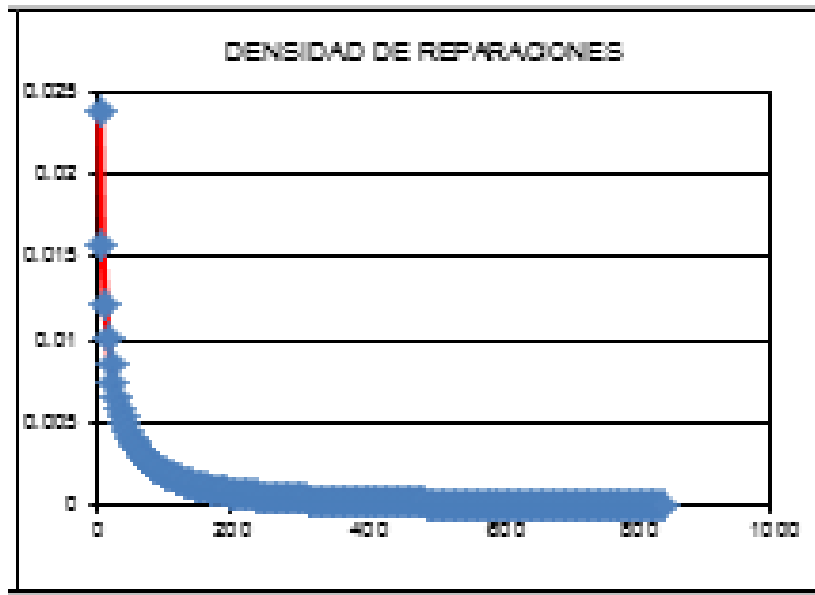
Para las bombas P-1501C y D se tienen MTTR similares de 3.4 y 5.7 horas, esto evidencia una rápida actuación del equipo de MNT y la relativa facilidad de mantenimientos de las bombas HPS Reda, Su fácil intercambiabilidad de piezas y elementos que requieren poco mantenimiento preventivo hacen de la tecnología de Schlumberger la más fácil de mantener, sin embargo su capacidad de reinyección está enfocada en términos de mediana cantidad, característica que las bombas P-1501 A y P-1501B marca Sulzer cumplen de mejor manera, ya que doblan y hasta triplica en su capacidad de reinyección de barriles de agua por día.

#### 4.3.6. *Curvas de índices de Mantenibilidad de la bomba P-1501E*



**Figura 4-30.** Curva de Mantenibilidad de bomba P-1501E.

**Fuente:** Autor-Software RAM Mora 2007.



**Figura 0-31.** Densidad de Reparaciones de bomba P-1501E.

**Fuente:** Autor-Software RAM Mora 2007.

Finalmente la bomba P-1501E HPS marca General Electric tiene el más alto MTTR, toma un promedio de 94.96 horas superar las fallas suscitadas. Esto en parte se debe a su diseño realizado en campo básicamente (proyecto donde se utilizó cuerpos de bomba, cámara de empuje y motor eléctrico que se disponía en ese instante y no con una ingeniería original del fabricante). Adicional, las fallas en sistemas auxiliares (sistema de seguridad e instrumentación) han tomado más tiempo del normal, las continuas mejoras o modificaciones de sus parámetros tanto por parte de la operadora como del fabricante han hecho un verdadero rompecabezas su mantenibilidad.

#### **4.4. Disponibilidad del sistema de reinyección de agua**

En el capítulo 3.8, se calculó la disponibilidad de cada una de las bombas del sistema de reinyección. La disponibilidad está en función de los tiempos medios entre fallas MTBF y los tiempos medios entre reparaciones MTTR.

En la tabla inferior se muestra un compendio de los resultados de la disponibilidad obtenidos de cada bomba y del sistema como tal de reinyección de agua; aclarando que la disponibilidad de sistema de reinyección se obtuvo mediante simulación Montecarlo, **esto en función de que la los conceptos de estructuras en serie y paralelo no aplican en forma muy clara a mantenibilidad, ya que este concepto es propio de la gestión de mantenimiento que realizan los diferentes grupos de trabajo humano que los ejecuta, a diferencia de la confiabilidad que es una característica inherente al equipo.** (Mora 2007).

**Tabla 4-4.** Resultados de la disponibilidad de las bombas de reinyección y el sistema total de reinyección.

<b>Bomba</b>	<b>Disponibilidad</b>
P-1501 <sup>a</sup>	97.55%
P-1501B	98.31%
P-1501C	99.49%
P-1501D	98.94%
P-1501E	93.04%
<b>Sistema de reinyección de agua</b>	<b>83.8%</b>

**Fuente:** Autor

Como se puede observar se tiene una disponibilidad del sistema de reinyección de agua 0.838. La disponibilidad del 83% no cumple el indicador deseado para Petroamazonas EP, la empresa tiene una meta de disponibilidad de equipos más alta como indicador clave de mantenimiento (KPI) por lo que implícitamente se debe mejorar la confiabilidad del sistema.



## CONCLUSIONES

1. Se determinó los índices de Confiabilidad del sistema de reinyección de agua de la empresa PETROAMAZONAS EP, Bloque 18 ZPF, en base a los tiempos de operación o buen funcionamiento de las bombas principales P-1501A, P-1501B, P-1501C, P-1501D y P-1501E,
2. Se determinó la curva de fiabilidad del sistema de reinyección de agua de la empresa PETROAMAZONAS EP, Bloque 18 ZPF, esto es la conjunción en paralelo de las bombas principales P-1501A, P-1501B, P-1501C, P-1501D y P-1501E,
3. Las bombas principales P-1501A, P-1501B, P-1501C, P-1501D y P-1501E son las que dominaron los datos del sistema de reinyección, el resto de equipos del sistema: bombas auxiliares, tanques y tuberías, no aportaron mayormente al histórico de fallas, de aquí la premisa que las bombas principales son las que simbolizan al sistema de reinyección de agua de Petroamazonas B18 ZPF, esto permite manifestar que el presente análisis CMD identifica plenamente al sistema de estudio.
4. Según la curva de fiabilidad del sistema de reinyección de agua calculada existe un periodo de alrededor de 42 días donde el sistema de reinyección de agua de la empresa PETROAMAZONAS EP, Bloque 18 ZPF, se mantendrá 100% disponible; después de este período es muy probable encontrar una falla en el sistema que inhabilite la función principal del mismo.
5. Las bombas P-1501 A, B. D y E mantuvieron un tiempo medio entre fallas MTBF, similar de 1289 horas en promedio. La excepción de este hecho la mantuvo la bomba P-1501C que mantuvo un MTBF de 671.81 horas, por lo que claramente requiere ser intervenida.

6. Las bombas principales del sistema de reinyección de agua mantuvieron un comportamiento de similitud en sus parámetros de forma  $\beta$ , por sus marcas y tiempo de estadía en el sistema. Es así que las bombas P-1501A y P-1501B marca Sulzer mantienen un  $\beta$  promedio de 1.41, siendo las primeras bombas instaladas y por ende las más utilizadas. Las bombas P-1501C y P-1501D marca Schlumberger mantienen un  $\beta$  promedio de 0.89 siendo relativamente recién instaladas y se encuentran el periodo de mortalidad infantil. Finalmente la bomba P-1501E marca General Electric mantiene un  $\beta$  de 0.91, esta fue la última bomba instalada en el sistema y tuvo algunas actualizaciones o modificaciones de diseño debido a su mortalidad infantil, sin embargo aún mantiene el status en la curva de Davies o de la Bañera.
7. Se calculó y analizo los índices de Mantenibilidad del sistema de reinyección de agua de la empresa PETROAMAZONAS EP, Bloque 18 ZPF, en base a los tiempos de reparación de las bombas principales P-1501A, P-1501B, P-1501C, P-1501D y P-1501E.
8. Los tiempos medios entre reparaciones MTTR, de las bombas P-1501 A y P-1501 B se encuentran en 30.98 y 23.67 horas. Mientras que los MTTR de 3.66 y 12.79 horas para las bombas P-1501 C y P-1501 D. Finalmente el MTTR de la bomba P-1501 E es de 100.76 horas. Los indicadores anteriores manifiestan que el sistema de reinyección de agua debe tener una autonomía (capacidad de almacenamiento de agua de reinyección) mínima de 4 días sin una de sus bombas.
9. Mediante simulación Montecarlo se pudo pronosticar la disponibilidad del sistema de reinyección de agua, su indicador de 0.83 para 8760 horas, fue obtenido en promedio de 400 repeticiones de simulación.

## RECOMENDACIONES

1. Validar los tiempos promedios entre fallas (MTBF) obtenidos en el presente trabajo, para las bombas principales del sistema de reinyección y reemplazarlos por sus mantenimientos preventivos basados aún en tiempo. El promedio de 1289 horas (53 días) es menor al tiempo actual que es de 2160 horas (trimestral).
2. Realizar un examen de aceptación FMECA o análisis de fallas para las bombas P-1501 C, P-1501D y P-1501E.
3. Realizar modificaciones de diseño, mejoras o rediseños de proceso en las bombas P-1501C, P-1501D y P-1501E cuyo parámetro de forma  $\beta$  es menor que 1. Esta recomendación también debe ser hecha para los activos pertenecientes al sistema de reinyección de agua que presentaron tasa de fallos constante y no aportaron a la data de análisis, esto es el caso de bombas auxiliares, tanques de almacenamiento y red de tuberías.
4. Se recomienda mejorar la gestión y manejo de inventarios, repuestos e insumos de mantenimiento del sistema de reinyección de agua de PETROAMAZONAS EP, Bloque 18 ZPF.
5. Implementar un software de análisis CMD que evalúe en tiempo actual los diferentes parámetros de cada uno de los activos importantes. Así se podrá tomar decisiones a nivel operacional, táctico y estratégico.
6. Recurrir a los instrumentos avanzados específicos en orden técnico de mantenimiento para las bombas cuyo parámetro de forma  $\beta$  sea mayor que 1.

7. Planificar la capacidad, mejora futura e inversión de un sistema de reinyección de agua en un campo de extracción de hidrocarburos en conjunción con el tiempo proyectado de extracción, esto en función de que el corte de agua disposal crece con el tiempo.
8. Realizar estudios que asocien el incremento de corte de agua disposal y el tiempo de extracción, esta probable relación seria de gran interés estratégico y económico para una empresa de extracción de hidrocarburo

,

## BIBLIOGRAFÍA

Mora Gutierrez, A., (2007) *Mantenimiento Estratégico Empresarial, Enfoque sistemático Kantiano*, Medellín, Colombia: Fondo Editorial Universidad EAFIT

Análisis RAM (Reliability, Availability, Maintainability) Chilworth a Dekra company, Valencia-Zaragoza-Barcelona-Madrid. Recuperado de:  
<http://www.chilworth.es/register.php>

Caña Puche, A. (2006) Análisis RAM de la planta de inyección de agua Resor de petróleos de Venezuela, S.A. (Tesis inédita de especialidad, Universidad Simón Bolívar), Recuperado de:  
<https://www.google.com/search?q=An%C3%A1lisis+RAM+de+la+planta+de+inyecci%C3%B3n+de+agua+resor+de+petr%C3%B3leos+de+Venezuela%2C+S.A.&ie=utf-8&oe=utf-8#>

Decreto Ejecutivo 1215, Registro Oficial 265 de 13 de Febrero del 2001. *Reglamento ambiental para las operaciones hidrocarburíferas del Ecuador*, 2001. Quito, Ecuador. Recuperado de: [www.iadb.org/Research/.../leyn/docs/ECU-Decreto-1215\(2\)-01.doc](http://www.iadb.org/Research/.../leyn/docs/ECU-Decreto-1215(2)-01.doc)

Gómez de la Vega, H, Medina, N. Semeco, K & Yáñez, M, *Análisis de la confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad en Sistemas Productivos*. Recuperado de:  
[http://r2menlinea.com/w3/PT/PT001\\_Analisis\\_CMD.pdf](http://r2menlinea.com/w3/PT/PT001_Analisis_CMD.pdf)

Hernando Gómez de la Vega, Medina N, Semeco K, Yanez M, *Análisis de la confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad en Sistemas Productivos*. Recuperado de:  
[http://r2menlinea.com/w3/PT/PT001\\_Analisis\\_CMD.pdf](http://r2menlinea.com/w3/PT/PT001_Analisis_CMD.pdf)

Placencia Urrutia, S. (2015) Módulo XII: *Gestión Tecnológica Y Económica De Activos Físicos, (Maestría en Gestión del Mantenimiento, Escuela superior Politécnica de Chimborazo)*

Rivera Mejía, J. Unidad I.- *Conceptos Básicos de Confiabilidad*. Recuperado de:  
[http://www.depi.itchihuahua.edu.mx/jrivera/inst\\_avan/notas\\_instavan\\_ui.pdf](http://www.depi.itchihuahua.edu.mx/jrivera/inst_avan/notas_instavan_ui.pdf)

Sexto, L.F. (2015) Módulo: *Ingeniería de la fiabilidad, (Maestría en Gestión del Mantenimiento, Escuela superior Politécnica de Chimborazo)*

Vergara Rea, E.J. (2007) *Análisis de confiabilidad, Disponibilidad y Manteneabilidad del sistema de crudo diluido de Petrozuata*, (Tesis inédita de Especialización, Universidad Simón Bolívar). Recuperado de:

[http://www.postgrado.usb.ve/archivos/95/Trabajo\\_Final\\_An%C3%A0lisis\\_RAM\\_Edgar\\_Vergara\\_Marzo2007.pdf](http://www.postgrado.usb.ve/archivos/95/Trabajo_Final_An%C3%A0lisis_RAM_Edgar_Vergara_Marzo2007.pdf)

Yanchapaxi Novillo, E. (2010) *Estudio del sistema de reinyección de agua de formación del EPF (facilidades de producción edén) y diseño de una solución que permita optimizar la presión y el caudal, así como mejorar el control y operación del sistema* (Tesis de Grado, Escuela Superior Politécnica del Ejercito). Recuperado de: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/2806>

*Distribución De Weibull - Minitab. Support.minitab.com.* N.p., 2016. Web. 4 July 2016.

Guevara, F., Kondo, N., Souza, G. y Patiño C. (2007). *Método para evaluación de disponibilidad en sistemas de generación de energía eléctrica– aplicado a turbinas de gas* –2016, recuperado de: <http://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjCnM7dr9DNAhVFIB4KHQyRBSUQjhwIAw&url=http%3A%2F%2Fcongreso.pucp.edu.pe%2Fcibim8%2Fpdf%2F06%2F06-84.pdf&bvm=bv.125801520,d.dmo&psig=AFQjCNGyByZSy9NltlRQwoPEBhpUuOUThg&ust=1467397365713571>

Mora Gutierrez, A., (2007) *Mantenimiento Estratégico Empresarial, Enfoque sistemático*  
*Kantiano*, Medellín, Colombia: Fondo Editorial Universidad EAFIT

Ferrer J., (2010) *Higiene y Seguridad Industrial*, I.U.T.A.



## ANEXOS

### Anexo A. Cálculo Hidráulico del sistema de Reinyección del ZPF

 <b>BOMBA DE 30000 BBL EN CPF</b> <b>Cálculo hidráulico</b>		Departamento:	Ingeniería
		Código No.:	18B003-ZPF-10-CLC-001
		Revisión:	1
		Página No.:	2 de 18

### ÍNDICE

1	OBJETIVO
2	ALCANCE
3	REFERENCIAS
4	CONSIDERACIONES
5	CÁLCULOS HIDRÁULICOS PARA EL SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA DE PRODUCCIÓN
6	CONCLUSIONES

 <b>BOMBA DE 30000 BBL EN CPF</b> <b>Cálculo hidráulico</b>		Departamento:	Ingeniería
		Código No.:	18B003-ZPF-10-CLC-001
		Revisión:	1
		Página No.:	3 de 18

## 1 OBJETIVO

Desarrollar el cálculo hidráulico para los manifold y tuberías principales del sistema de inyección de agua de producción.

## 2 ALCANCE

En este documento se presenta el cálculo hidráulico para el sistema de inyección de agua de producción, desde los tanques de almacenamiento de agua hasta la tubería de inyección en el pozo. Los resultados reportados incluyen presión, temperatura y velocidad de flujo.

## 3 REFERENCIAS

Para el desarrollo del presente cálculo, se tomó como referencia la información de los siguientes planos:

- 18B006-ZPF-01-001, P&ID Tanque de almacenamiento de agua de producción, "serie B".
- 18B006-ZPF-01-002, P&ID Tanque de almacenamiento de agua de producción, "serie A".
- 379Y0183-10-001-PI-M-PEE003, P&ID Bombas booster del sistema de inyección de agua CPF P-1503 A/B/C/D.
- 18B006-ZPF-01-003, P&ID bombas de agua de inyección, "series A y B".
- 379Y0183-10-001-PI-M-PEE001, P&ID HPS P-1501C/D DEL SISTEMA DE INYECCION DE AGUA CPF.
- 18B003-ZPF-01-001, P&ID Bomba de inyección de agua de 30000 BBL
- API RP 14E Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Piping Systems

## 4 CONSIDERACIONES


### 4.1 Caracterización de fluidos

Para la caracterización de la fase acuosa se consideró una gravedad específica típica de 0.98.

### 4.2 Criterios de diseño

La norma API RP 14E señala que las líneas que transportan líquido como flujo en una fase se dimensionan principalmente en base de la velocidad de flujo.

De acuerdo al criterio de dicha norma, para líneas que transportan líquidos en una fase desde un recipiente hacia otro, por diferencia de presión, la velocidad de flujo no debe exceder los 15 ft/s en el máximo caudal con el fin de evitar discontinuidades en el flujo. En la línea de succión, la velocidad de flujo no debe ser menor a 3 ft/s con el fin de minimizar la deposición de arena y sólidos.

 <b>BOMBA DE 30000 BBL EN CPF</b>  <b>Cálculo hidráulico</b>		Departamento:	Ingeniería
		Código No.:	18B003-ZPF-10-CLC-001
		Revisión:	1
		Página No.:	4 de 18

#### 4.3 Operación del sistema

El agua de producción almacenada en los tanques T-1501A/B y T-1402, es succionada por las bombas booster P-1503 A/B/C/D en donde se obtiene una presión de descarga de 50 psig. Esta corriente ingresa a la succión de las bombas de inyección de agua P-1501 A/B (Sulzer) y P-1501 C/D (HPS), en donde se obtiene una presión de descarga de 2500 psig, para luego ser enviada hacia los pozos de re-inyección. La nueva bomba P-1501E (WG) que tiene una presión de descarga de 2784 psig, se conectará al sistema de bombas existente y formará parte del sistema de inyección de agua de producción.

La capacidad de las bombas booster es de 800 GPM cada una, y suministra la presión de succión requerida en las bombas de inyección. La capacidad de las bombas P-1501 A/B es de 1130 GPM, la capacidad de las bombas P-1501 C/D es de 510 GPM, cada una; mientras que la capacidad de la bomba P-1501E es de 817 GPM.

La operación de las bombas booster depende del caudal de agua requerido para inyección. En la tabla I se presentan los escenarios de operación del sistema de bombeo de acuerdo a los requerimientos del sistema de inyección de agua.

**TABLA I**

**Escenarios de operación: Bombas booster y bombas de inyección de agua de producción.**

Escenario	Bombas booster en operación	Bombas de inyección en operación
1	Tres Booster	Una Sulzer + Una HPS
2	Dos Booster	Una Sulzer
3	Una Booster	Una HPS
4	Tres Booster	Dos Sulzer
5	Dos Booster	Una WG

A continuación se presentan las características de las bombas booster P-1503 A/B/C/D, del sistema de inyección.

**TABLA II**

**Características del sistema de bombeo booster, P-1503 A/B/C/D.**

Descripción	Característica
Capacidad	800 GPM
TDH Cabeza Diferencial	120 ft
Presión diferencial	50 psig
Tipo	Centrifuga Horizontal OH1
Gravedad específica	0.98
NPSH Requerido	6,7 ft
HP motor	40 hp
RPM Bomba/Motor	1780 rpm

 <b>BOMBA DE 30000 BBL EN CPF</b>  <b>Cálculo hidráulico</b>	Departamento: Ingeniería	
	Código No.:	18B003-ZPF-10-CLC-001
	Revisión:	1
	Página No.:	5 de 18

El proceso de inyección de agua de producción se realiza mediante las bombas centrífugas horizontales Sulzer: P-1501A/B, las bombas centrífugas multi-etapa HPS: P-1501 C/D y la nueva bomba centrífuga multietapa WG: P-1501E; dispuestas en paralelo, con una presión de descarga de 2500 psig y 2784 psig respectivamente. En la siguiente tabla a continuación se presentan las características de diseño de las bombas de inyección de agua de producción.

**TABLA III**

**Características del sistema de bombeo**

Características	Unidades	Sulzer	Reda HPS	WG
		P-1501 A/B.	P-1501 C/D	P-1501 E
Capacidad de bombeo	GPM	1130	510	817
Presión diferencial	Psig	2500	2500	2784
Gravedad específica	--	0,98	0,98	0,98
NPSH Requerido	ft	13,5	25,11	24
RPM Bomba/Motor	RPM	3560 – 3600	3560	3550
Temperatura	°F	133,7	180	176

Para las bombas Sulzer P-1501 A/B el flujo mínimo de agua de inyección debe ser mayor de 16000 BPD, si la presión de descarga llega a caer por debajo de la condición de operación, el sistema Sulzer cuenta con una válvula ARC-P1501A/B-1 tipo YARWAY, que permite bloquear la descarga y la recircula hacia el tanque T-1501A/B.

Para las bombas HPS P-1501 C/D y WG P1501 E, se ha provisto de los lazos de control para recirculación por presión (PCV P1501 C/D/E -1), su función principal es recircular el flujo bombeado con estas unidades hasta alcanzar la presión de inyección del sistema permitiendo ingresar a estas unidades al cabezal de inyección de agua. En vista de que el arranque de estas unidades es a baja frecuencia motivo por el cual se debe contar con una recirculación. Estas válvulas cuentan con arreglos especiales para permitir la caída de presión a niveles de trabajo en el cabezal de recirculación 6"-TW-11063-AA3-PP.

## 5 CÁLCULOS HIDRÁULICOS PARA EL SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA DE PRODUCCIÓN

Los cálculos hidráulicos para los manifolds y tuberías del sistema de inyección de agua de producción fueron realizados a partir del análisis nodal de la red, considerando las características del sistema de bombeo descritas anteriormente.

### 5.1. Parámetros para el cálculo hidráulico

Los parámetros de diseño para el cálculo hidráulico se presentan a continuación:

- A partir de los datos mostrados en la tabla IV se obtuvo la corriente que ingresa a la red de tuberías del sistema de inyección.

 <b>BOMBA DE 30000 BBL EN CPF</b> <b>Cálculo hidráulico</b>		Departamento:	Ingeniería
		Código No.:	18B003-ZPF-10-CLC-001
		Revisión:	1
		Página No.:	6 de 18

**TABLA IV**

**Parámetros de diseño para el cálculo hidráulico del sistema de inyección.**

Parámetro	Unidades	Valor
Temperatura del agua	°F	160
Presión hidrostática en tanque de almacenamiento	psig	5.8
Flujo de agua de producción (Bombas booster)	GPM	3200

El flujo de agua de producción fue establecido de acuerdo a la capacidad de bombeo de las bombas booster P-1503 A/B/C/D, de 800 GPM cada una.

- Para la construcción de la red se identificó y caracterizó a las tuberías como se muestra en la tabla a continuación.

**TABLA V**

**Características de las tuberías empleadas en el cálculo hidráulico**

Identificación	Diámetro Nominal [in]	Cédula	Diámetro Externo [in]	Diámetro Interno [in]	Espesor de la pared [in]
AA3	8	40	8.625	7.981	0.322
	10	40	10.75	10.02	0.365
	12	STD	12.75	12.00	0.375
	16	STD	16.00	15.25	0.375
	20	XS	20.00	19.00	0.500
FA2	6	160	6.625	5.187	0.719
	8	160	8.625	6.813	0.906
	12	160	12.75	10.126	1.312

Las características del material de la tubería se describen a continuación:

- Rugosidad absoluta de la tubería (acero): 0,00180 in
- Conductividad Térmica del material de la tubería: 28 Btu / h ft °F.
- Medio circundante: aire, T = 80 °F.

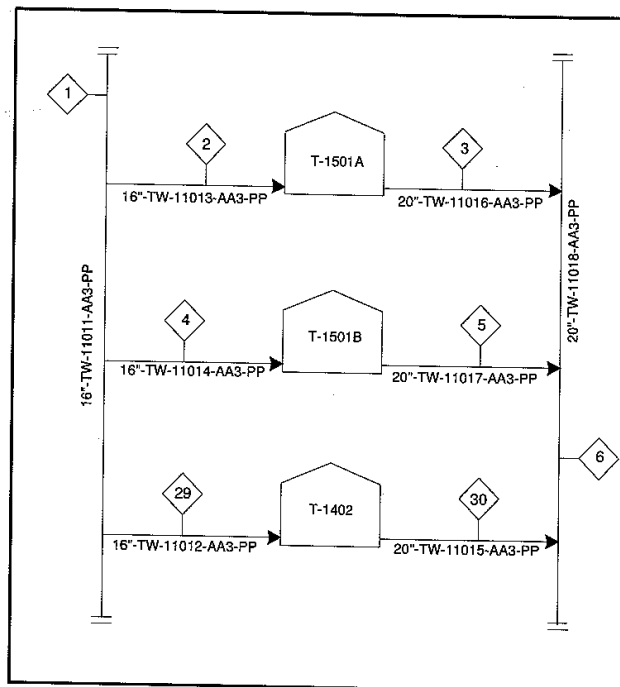
**5.2. Resultados para el tanque de almacenamiento de agua de producción**

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los manifolds y tuberías de los tanques de almacenamiento de agua de producción. La figura 1 presenta el esquema del proceso para el cálculo hidráulico.

	<b>BOMBA DE 30000 BBL EN CPF</b>  <b>Cálculo hidráulico</b>		Departamento:	Ingeniería
			Código No.:	18B003-ZPF-10-CLC-001
			Revisión:	1
			Página No.:	7 de 18

**FIGURA I**

**Esquema del proceso para los tanques de almacenamiento de agua de producción.**





En la tabla VI, se presentan los resultados de temperatura, presión y velocidad de flujo en la conducción para el llenado y vaciado del tanque T-1501B que es el más alejado de las bombas de inyección de agua, representado en el esquema de la figura I,

**TABLA VI**

**Resultados del cálculo hidráulico para el tanque de almacenamiento de agua de producción.**

Name	1	4	5	6
Pressure [psig]	7,00	6,80	5,80	5,72
Temperature [F]	159,71	158,26	158,35	154,00
Liq Vol Flow [GPM]	3000,00	3000,00	3200,00	3200,00
Mass Density [lb/ft3]	13,82	13,73	13,73	13,44
Viscosity [cP]	0,40	0,40	0,40	0,41
Flow velocity [ft/s]	5,41	5,41	3,71	3,71

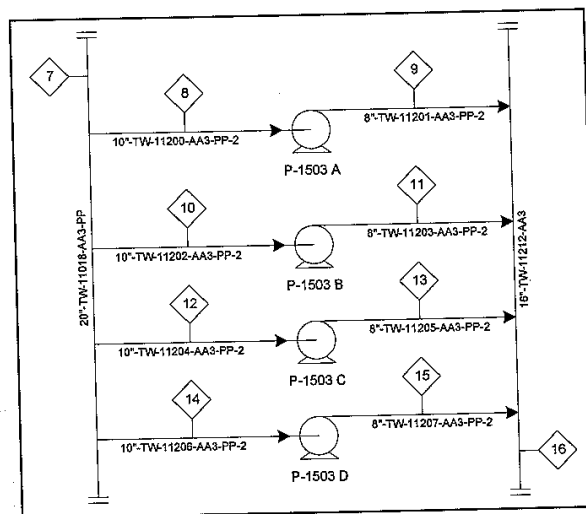
 <b>BOMBA DE 30000 BBL EN CPF</b> <b>Cálculo hidráulico</b>		Departamento:	Ingeniería
		Código No.:	18B003-ZPF-10-CLC-001
		Revisión:	1
		Página No.:	8 de 18

### 5.3. Resultados para el sistema de bombeo booster P-1503 A/B/C/D

Como se explicó anteriormente, la operación de las bombas booster depende del caudal de agua requerido para inyección. A continuación se presentan los resultados obtenidos para los escenarios descritos en la tabla I, considerando el flujo de agua correspondiente a la capacidad de bombeo de cada sistema. La figura II presenta el esquema del proceso para el cálculo hidráulico.

**FIGURA II**

**Esquema del proceso para las bombas booster de agua de producción.**





#### • Operación con la capacidad total de bombeo

La tabla VII se presentan los resultados obtenidos para el cálculo hidráulico de las bombas booster P-1503 A/B/C/D, considerando un caudal de operación de 3200 GPM, correspondiente a la capacidad de diseño de cada bomba (800 GPM).

**TABLA VII**

**Resultados del cálculo hidráulico para las bombas booster.**

Name	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Pressure [psig]	5,6	5,6	64,0	5,6	64,9	5,6	64,0	5,6	64,0	49,8
Temperature [F]	153,3	153,3	152,7	153,3	152,9	153,3	152,7	153,3	152,9	152,7
Liq Vol Flow [GPM]	3200	800	800	800	800	800	800	800	800	3200
Mass Density [lb/ft <sup>3</sup> ]	13,40	13,40	13,33	13,40	13,35	13,40	13,33	13,40	13,35	13,34
Viscosity [cP]	0,415	0,415	0,417	0,415	0,417	0,415	0,417	0,415	0,417	0,417
Flow velocity [ft/s]	3,6	3,3	5,2	3,3	5,2	3,3	5,2	3,3	5,2	5,7

 <b>BOMBA DE 30000 BBL EN CPF</b> 	Departamento:	Ingeniería
	Código No.:	18B003-ZPF-10-CLC-001
	Revisión:	1
	Página No.:	9 de 18

### Cálculo hidráulico

- **Escenario 1: tres bombas booster, una bomba Sulzer y una bomba HPS en operación**

El caudal de agua requerido fue determinado a partir de la capacidad de bombeo de la bomba Sulzer de 1130 GPM y de la capacidad de bombeo de la bomba HPS de 510 GPM. Este flujo corresponde a una capacidad de operación de 546 GPM en cada una de las tres bombas booster que se encuentran operativas, en este escenario.

Los resultados para el cálculo hidráulico de las bombas booster se presentan en la tabla VIII, y hacen referencia al esquema de proceso mostrado en la figura II.

**TABLA VIII**

#### **Resultados del cálculo hidráulico para el escenario 1.**

Name	7	10	11	12	13	14	15	16
Pressure [psig]	5,6	5,6	65,0	5,6	65,0	5,6	65,0	49,9
Temperature [F]	153,3	153,3	152,7	153,3	152,3	153,3	152,7	152,4
Liq Vol Flow [GPM]	3200	546	546	546	546	546	546	1638
Mass Density [lb/ft <sup>3</sup> ]	13,40	13,40	13,34	13,40	13,31	13,40	13,33	13,32
Viscosity [cP]	0,415	0,415	0,417	0,415	0,419	0,415	0,417	0,418
Flow velocity [ft/s]	3,6	2,2	3,5	2,2	3,5	2,2	3,5	2,9

Caudal de operación: 546 GPM

Bombas booster en operación: 3.

- **Escenario 2: dos bombas booster y una bomba Sulzer en operación**

El caudal de agua requerido fue determinado a partir de la capacidad de la bomba Sulzer de 1130 GPM. Este flujo corresponde a una capacidad de operación de 565 GPM en las dos bombas booster que se encuentran operativas, en este escenario.

Los resultados para el cálculo hidráulico de las bombas booster se presentan en la tabla IX y hacen referencia al esquema de proceso mostrado en la figura II.

**TABLA IX**



#### **Resultados del cálculo hidráulico para el escenario 2.**

Name	7	12	13	14	15	16
Pressure [psig]	5,6	5,6	65,0	5,6	65,0	49,9
Temperature [F]	153,3	116,7	116,3	153,3	152,7	134,3
Liq Vol Flow [GPM]	3200	565	565	565	565	1130
Mass Density [lb/ft <sup>3</sup> ]	13,40	11,06	11,02	13,40	13,34	12,15
Viscosity [cP]	0,415	0,573	0,575	0,415	0,417	0,486
Flow velocity [ft/s]	3,6	2,3	3,7	2,3	3,7	2,0

Caudal de operación: 565 GPM,

Bombas booster en operación: 2.



 <b>BOMBA DE 30000 BBL EN CPF</b> <b>Cálculo hidráulico</b>		Departamento:	Ingeniería
		Código No.:	18B003-ZPF-10-CLC-001
		Revisión:	1
		Página No.:	10 de 18

- **Escenario 3: una bomba booster y una bomba HPS en operación**

El caudal de agua en la descarga de la bomba booster fue determinado a partir de la capacidad de la bomba HPS de 510 GPM.

Los resultados para el cálculo hidráulico de la bomba booster en el escenario 3 se presentan en la tabla X y hacen referencia al esquema de proceso mostrado en la figura II.

**TABLA X**

**Resultados del cálculo hidráulico para el escenario 3**

Name	7	14	15	16
Pressure [psig]	5,6	5,6	65,0	49,9
Temperature [F]	153,3	153,3	152,6	152,1
Liq Vol Flow [GPM]	3200	510	510	510
Mass Density [lb/ft <sup>3</sup> ]	13,40	13,40	13,33	13,30
Viscosity [cP]	0,415	0,415	0,418	0,419
Flow velocity [ft/s]	3,6	2,1	3,3	0,9

Caudal de operación: 510 GPM

Bombas booster en operación: 1.

- **Escenario 4: tres bombas booster y dos bombas Sulzer en operación**

El caudal de agua requerido fue determinado a partir de la capacidad de la bomba Sulzer de 1130 GPM. Este flujo corresponde a una capacidad de operación de 753,33 GPM en cada bomba booster que se encuentran operativas, en este escenario.

Los resultados para el cálculo hidráulico de la bomba booster en el escenario 4 se presentan en la tabla XI y hacen referencia al esquema de proceso mostrado en la figura II.

**TABLA XI**

**Resultados del cálculo hidráulico para el escenario 4.**

Name	7	10	11	12	13	14	15	16
Pressure [psig]	5,58	5,55	50,00	5,51	50,00	5,54	49,94	64,92
Temperature [F]	153,26	153,00	153,06	152,68	152,74	152,93	152,85	152,37
Liq Vol Flow [GPM]	3200,00	753,33	753,33	753,33	753,33	753,33	753,33	2259,99
Mass Density [lb/ft <sup>3</sup> ]	13,39	13,38	13,37	13,36	13,34	13,37	13,35	13,31
Viscosity [cP]	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
Flow velocity [ft/s]	3,71	3,14	4,95	3,14	4,95	3,14	4,95	4,06

Caudal de operación: 753.33 GPM

Bombas booster en operación: 3.

 <b>BOMBA DE 30000 BBL EN CPF</b> <b>Cálculo hidráulico</b>		Departamento:	Ingeniería
		Código No.:	18B003-ZPF-10-CLC-001
		Revisión:	1
		Página No.:	11 de 18

- **Escenario 5: dos bombas booster y una bomba WG en operación**

El caudal de agua requerido fue determinado a partir de la capacidad de la bomba WG de 817 GPM. Este flujo corresponde a una capacidad de operación de 408,5 GPM en cada bomba booster que se encuentran operativas, en este escenario.

Los resultados para el cálculo hidráulico de la bomba booster en el escenario 5 se presentan en la tabla XII y hacen referencia al esquema de proceso mostrado en la figura II.

**TABLA XII**

**Resultados del cálculo hidráulico para el escenario 5.**

Name	7	12	13	14	15	16
Pressure [psig]	5,58	5,56	65,00	5,57	65,00	64,98
Temperature [F]	153,26	116,14	116,22	152,64	152,72	134,29
Liq Vol Flow [GPM]	3200,00	408,50	408,50	408,50	408,50	817,00
Mass Density [lb/ft3]	13,39	11,03	11,01	13,35	13,34	12,15
Viscosity [cP]	0,42	0,58	0,58	0,42	0,42	0,49
Flow velocity [ft/s]	3,71	1,67	2,64	1,70	2,68	1,46

Caudal de operación: 408.50 GPM  
Bombas Booster en operación: 2.

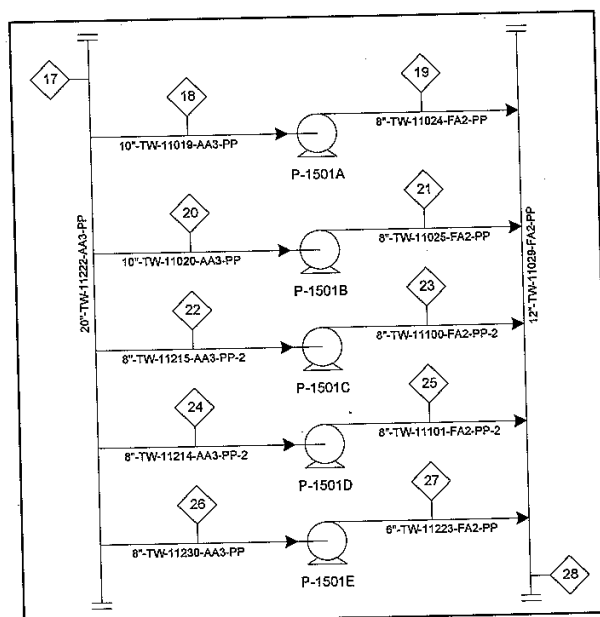
	<b>BOMBA DE 30000 BBL EN CPF</b>  <b>Cálculo hidráulico</b>		Departamento:	Ingeniería
			Código No.:	18B003-ZPF-10-CLC-001
			Revisión:	1
			Página No.:	12 de 18

**5.4. Resultados para el sistema de bombeo de inyección Sulzer P-1501 A/B , HPS P-1501 C/D y WG P-1501E**

El cálculo hidráulico para el sistema de bombeo de inyección fue desarrollado de acuerdo a los escenarios descritos en la tabla I. El flujo de agua en el cabezal de succión corresponde a la capacidad de bombeo del sistema booster, descrito anteriormente. La figura III presenta el esquema del proceso para el cálculo hidráulico.

**FIGURA III**

**Esquema del proceso para las bombas de inyección de agua de producción Sulzer P-1501 A/B, HPS P-1501 C/D y WG P-1501E.**



• **Operación con la capacidad total de bombeo**

La tabla XIII se presentan los resultados obtenidos para el cálculo hidráulico de las bombas de inyección P-1501 A/B/C/D, considerando un caudal de operación de 3200 GPM, correspondiente a la capacidad de diseño de las bombas booster (800 GPM).

 <b>BOMBA DE 30000 BBL EN CPF</b> <b>Cálculo hidráulico</b>		Departamento:	Ingeniería
		Código No.:	18B003-ZPF-10-CLC-001
		Revisión:	1
		Página No.:	13 de 18

**TABLA XIII**

**Resultados del cálculo hidráulico para las bombas de inyección.**

Name	17	18	19	20	21	22	23	24	25	28
Pressure [psig]	49,7	49,7	2560,6	49,7	2561,3	49,7	2563,5	49,7	2562,2	2496,9
Temperature [F]	152,2	152,8	155,6	152,2	155,0	152,2	154,3	152,2	154,3	154,5
Liq Vol Flow [GPM]	3200	1110	1110	1110	1110	490	490	490	490	3200
Mass Density [lb/ft <sup>3</sup> ]	13,31	13,35	12,61	13,31	12,58	13,31	12,53	13,31	12,53	12,57
Viscosity [cP]	0,419	0,417	0,408	0,419	0,410	0,419	0,412	0,419	0,412	0,411
Flow velocity [ft/s]	3,7	4,6	9,8	4,6	9,8	3,2	4,3	3,2	4,3	12,8

Caudal de operación 3200 GPM

- **Escenario 1: tres bombas booster, una bomba Sulzer y una bomba HPS en operación**



El flujo de agua de inyección corresponde a la capacidad de las bombas de inyección Sulzer y HPS que se encuentran en operación. Los resultados del cálculo se presentan en la tabla XIV y hacen referencia al esquema mostrado en la figura III.

**TABLA XIV**

**Resultados del cálculo hidráulico para el escenario 1.**

Name	17	18	19	22	23	28
Pressure [psig]	49,9	49,7	2562,2	49,7	2564,4	2499,2
Temperature [F]	151,4	151,4	154,2	151,4	153,6	153,1
Liq Vol Flow [GPM]	1638	1130	1130	508	508	1638
Mass Density [lb/ft <sup>3</sup> ]	13,26	13,26	12,52	13,26	12,49	12,48
Viscosity [cP]	0,422	0,422	0,412	0,422	0,414	0,416
Flow velocity [ft/s]	1,9	4,6	10,0	3,3	4,5	6,5

Caudal de operación: Sulzer 1130 GPM y HPS 508 GPM.  
Bombas en operación: 2 (1 Sulzer y 1 HPS)

	<b>BOMBA DE 30000 BBL EN CPF</b>  <b>Cálculo hidráulico</b>		Departamento:	Ingeniería
			Código No.:	18B003-ZPF-10-CLC-001
			Revisión:	1
			Página No.:	14 de 18

- **Escenario 2: dos bombas booster y una bomba Sulzer en operación**

El flujo de agua de inyección corresponde a la capacidad de la bomba Sulzer que se encuentra en operación. Los resultados para el cálculo hidráulico se presentan en la tabla XV y hacen referencia al esquema de proceso mostrado en la figura III.

**TABLA XV**

**Resultados del cálculo hidráulico para el escenario 2.**

Name	17	18	19	28
Pressure [psig]	49,9	49,7	2599,1	2499,6
Temperature [F]	133,3	133,3	136,1	135,1
Liq Vol Flow [GPM]	1130	1130	1130	1130
Mass Density [lb/ft <sup>3</sup> ]	12,09	12,09	11,40	11,37
Viscosity [cP]	0,491	0,491	0,479	0,483
Flow velocity [ft/s]	1,3	4,6	10,0	4,6

Caudal de operación: 1130 GPM.  
Bombas en operación: 1 Sulzer

- **Escenario 3: una bomba booster y una bomba HPS en operación**



El flujo de agua de inyección corresponde a la capacidad de la bomba Sulzer que se encuentra en operación. Los resultados para el cálculo hidráulico se presentan en la tabla XVI y hacen referencia al esquema de proceso mostrado en la figura III.

**TABLA XVI**

**Resultados del cálculo hidráulico para el escenario 3.**

Name	17	24	25	28
Pressure [psig]	49,9	49,7	2819,1	2499,9
Temperature [F]	149,2	149,2	151,8	149,1
Liq Vol Flow [GPM]	510	510	510	510
Mass Density [lb/ft <sup>3</sup> ]	13,11	13,11	12,28	12,23
Viscosity [cP]	0,429	0,429	0,420	0,429
Flow velocity [ft/s]	0,6	3,3	4,5	2,0

Caudal de operación: 510 GPM.  
Bombas en operación: 1 HPS

 <b>BOMBA DE 30000 BBL EN CPF</b> <b>Cálculo hidráulico</b>		Departamento:	Ingeniería
		Código No.:	18B003-ZPF-10-CLC-001
		Revisión:	1
		Página No.:	15 de 18

- **Escenario 4: tres bombas booster y dos bombas Sulzer en operación**

El flujo de agua de inyección corresponde a la capacidad de la bomba WG que se encuentra en operación. Los resultados para el cálculo hidráulico se presentan en la tabla XVII y hacen referencia al esquema de proceso mostrado en la figura III.

**TABLA XVII**

**Resultados del cálculo hidráulico para el escenario 4.**

Name	17	18	19	20	21	28
Pressure [psig]	64,87	49,62	2500,00	49,63	2500,00	2497,42
Temperature [F]	151,64	152,47	155,80	151,91	155,24	154,73
Liq Vol Flow [GPM]	2259,99	1130,00	1130,00	1129,99	1129,99	2259,99
Mass Density [lb/ft3]	13,27	13,33	12,65	13,29	12,61	12,58
Viscosity [cP]	0,42	0,42	0,41	0,42	0,41	0,41
Flow velocity [ft/s]	2,62	4,71	10,13	4,71	10,13	9,17

Caudal de operación: 1130 GPM.  
Bombas en operación: 2 Sulzer

- **Escenario 5: dos bombas booster y una bomba WG en operación**



El flujo de agua de inyección corresponde a la capacidad de la bomba WG que se encuentra en operación. Los resultados para el cálculo hidráulico se presentan en la tabla XVIII y hacen referencia al esquema de proceso mostrado en la figura III.

**TABLA XVIII**

**Resultados del cálculo hidráulico para el escenario 5.**

Name	17	26	27	28
Pressure [psig]	49,89	49,53	2784,00	2783,78
Temperature [F]	132,82	133,02	136,95	134,76
Liq Vol Flow [GPM]	817,00	817,00	817,00	817,00
Mass Density [lb/ft3]	12,06	12,07	11,39	11,26
Viscosity [cP]	0,49	0,49	0,48	0,48
Flow velocity [ft/s]	0,94	5,32	12,53	3,28

Caudal de operación: 817 GPM.  
Bombas en operación: 1 WG

 <b>BOMBA DE 30000 BBL EN CPF</b> 	Departamento:	Ingeniería
	Código No.:	18B003-ZPF-10-CLC-001
	Revisión:	1
	Página No.:	16 de 18

### Cálculo hidráulico



#### 5.5. Resultados para la bomba de inyección P-1501 E

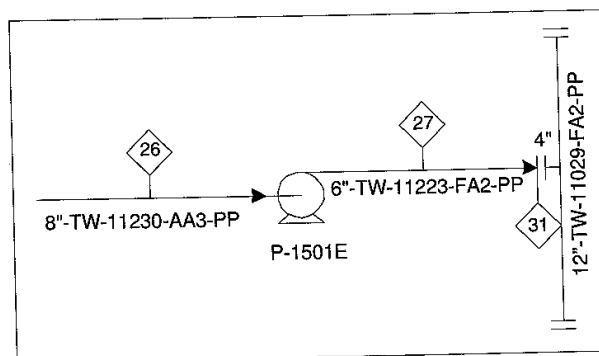
La bomba de inyección P-1501 E fue evaluada de acuerdo a su capacidad normal y máxima de bombeo de 28011 BPD (817 GPM) y 34200 BPD (997,5 GPM) respectivamente, con el fin de estimar su comportamiento en condiciones de flujo normal y máximo.

La bomba P-1501E descarga a través de la línea 6"-TW-11223-FA2-PP, que se conecta a la facilidad existente de 4" en la línea de descarga de las bombas de inyección 12"-TW-11029-FA2-PP, esta conexión es provisional hasta que se tenga los accesorios de 6" (TIE IN 010) para que la conexión con la línea 12"-TW-11029-FA2-PP sea de 6" de diámetro.

La figura IV presenta el esquema del proceso para la bomba de inyección y los resultados se presentan en la tabla XIX y XX a continuación.

**FIGURA IV**

**Esquema de proceso para la bomba de inyección de agua de producción P-1501E.**



**BOMBA DE 30000 BBL EN CPF****Cálculo hidráulico**

Departamento:	Ingeniería
Código No.:	18B003-ZPF-10-CLC-001
Revisión:	1
Página No.:	17 de 18

**TABLA XIX**

**Resultados del cálculo hidráulico para la bomba P-1501 E en función del caudal normal de operación: 817 GPM.**

Name	26	27	31
Pressure [Psig]	49,46	2784,00	2781,61
Temperature [F]	133,01	136,94	136,70
Liq Vol Flow [GPM]	817,00	817,00	817,00
Mass Density [lb/ft3]	12,07	11,39	11,38
Viscosity [cP]	0,49	0,48	0,48
Flow velocity [ft/s]	5,82	12,53	28,51

**TABLA XX**

**Resultados del cálculo hidráulico para la bomba P-1501 E en función del caudal máximo de operación: 997,5 GPM.**

Name	26	27	31
Pressure [Psig]	49,32	2784,00	2780,46
Temperature [F]	133,06	136,99	136,80
Liq Vol Flow [GPM]	997,50	997,50	997,50
Mass Density [lb/ft3]	12,07	11,39	11,38
Viscosity [cP]	0,49	0,48	0,48
Flow velocity [ft/s]	7,11	15,29	34,81

## **6 CONCLUSIONES**

- La velocidad de flujo de agua de producción en los escenarios evaluados es menor a 15 ft/s, de modo que se cumple con el criterio de velocidad en el máximo caudal recomendado por la norma API RP 14E, para flujo de líquidos en una fase.



- Para el caudal normal de operación de la bomba P-1501E de 817 GPM (28011 BPD), las velocidades de flujo del agua en las tuberías de succión (8") y de descarga (6") son de 5,82 ft/s y 12,53 ft/s respectivamente. Sin embargo en la conexión temporal a la facilidad existente de 4" la velocidad del flujo es de 28,51 ft/s, la cual sobrepasa a la velocidad erosional 18,91 ft/seg.

Por otra parte, con el caudal máximo de operación 997,5 GPM (34200 BPD), se obtienen velocidades de 7,11 ft/s y 15,29 ft/s en las tuberías de succión (8") y de descarga (6") respectivamente. Sin embargo en la conexión temporal a la facilidad existente de 4" la velocidad del flujo es de 34,81 ft/s, la cual sobrepasa a la velocidad erosional de 18,91 ft/seg.



 <b>BOMBA DE 30000 BBL EN CPF</b>  <b>Cálculo hidráulico</b>		Departamento:	Ingeniería
		Código No.:	18B003-ZPF-10-CLC-001
		Revisión:	1
		Página No.:	18 de 18

En ambos casos la velocidad en la conexión temporal a la facilidad existente de 4" sobrepasa el rango de velocidad aceptable dado por la velocidad erosional, lo que podría producir alta vibración en la tubería y daño en los accesorios.

La conexión definitiva se realizará en 6" en el TIE IN 010 del P&ID 18B006-ZPF-01-003 Rev 1 en la línea 12"-TW-11029-FA2-PP, con una programación previa de parada de planta y cuando PETROAMAZONAS EP solicite y tenga los accesorios definitivos.

- El cabezal de succión hacia las bombas de inyección, 20"-TW-11222-AA3, en los escenarios de operación estudiados presenta velocidades de flujo menores a 3 ft/s.
- Las velocidades de flujo calculadas indican que la configuración de la red de tuberías para el sistema de inyección de agua no presenta problemas de discontinuidad en el flujo debido a las altas velocidades del fluido. Sin embargo, se debe considerar la posible acumulación de sólidos en los tramos en los que la velocidad sea menor a 3 ft/s.

**Anexo B.** Listado de trabajos que implicaron Down Time en bomba P-1501B. Fuente: Maximo IBM 2011-2016, Petroamazonas  
EP -Autor

OT	DESCRIPCION	TIPO	AREA	FECHA	UT (horas)	DT (horas)
OT-110098452	CAMBIO DE VÁLVULA DE PLAN API DE BOMBA SULZER P-1501 B	CMP	CR-PA-ME	3/1/2011 6:15:00 AM		
OT-110015763	CAMBIO DE VÁLVULA DE PLAN API DE BOMBA SULZER P-1501 B	CMP	CR-PA-ME	3/1/2011 3:30:00 PM	689:00:00	9:15:00
	COLOCAR ACEITE SINTETICO EN BOMBAS SULZER, MIGRACION			3/30/2011 8:30:00 AM		
OT-110032547	DE LUBRICACION, FLUSHING	PYT	CR-PA-ME			
	COLOCAR ACEITE SINTETICO EN BOMBAS SULZER, MIGRACION			3/30/2011 11:00:00 AM	2567:00:00	2:30:00
OT-110078945	DE LUBRICACION, FLUSHING	PYT	CR-PA-ME			
OT-110074125	LIMPIEZA Y PUESTA A PUNTO PARA ARRANQUE DE BOMBA P-1501 B	PBP	CR-PA-ME	7/15/2011 10:00:00 AM		
	LIMPIEZA Y PUESTA A PUNTO PARA ARRANQUE DE BOMBA P-1501 B			7/15/2011 12:30:00 PM	1553:30:00	2:30:00
OT-110085296		PBP	CR-PA-ME			
OT-110136875	REVISION DE JUEGO AXIAL DE BOMBA SULZER P-1501 B EN HMI	PBP	CR-PA-IN	9/18/2011 6:00:00 AM		
OT-110154567	REVISION DE JUEGO AXIAL DE BOMBA SULZER P-1501 B EN HMI	PBP	CR-PA-IN	9/20/2011 6:00:00 PM	73:30:00	60:00:00
	CAMBIO DE COJINETE RADIAL DE BOMBA P-1501 B (APOYO A ECUAPET)			9/23/2011 7:30:00 PM		
OT-110165423	CAMBIO DE COJINETE RADIAL DE BOMBA P-1501 B (APOYO A ECUAPET)	CME	CR-PA-ME			
				9/28/2011 8:30:00 AM	1128:30:00	109:00:00
OT-110180023	CORRECCION DE FUGA POR STRAINER BRAZO A DE BOMBA P-1501 B	CME	CR-PA-ME			
				11/14/2011 9:00:00 AM		
OT-110235795	CORRECCION DE FUGA POR STRAINER BRAZO A DE BOMBA P-1501 B	CME	CR-PA-ME			
				11/14/2011 10:25:00 AM	1652:35:00	1:25:00
OT-110565893	REVISAR EL MOVIMIENTO AXIAL DEL EJE DE LA BOMBA P-1501 B CHAVEZB	CME	CR-PA-ME			
				1/22/2012 7:00:00 AM		
OT-120015198	REVISAR EL MOVIMIENTO AXIAL DEL EJE DE LA BOMBA P-1501 B CHAVEZB	PMP	CR-PA-ME			
				1/22/2012 1:00:00 PM	672:00:00	6:00:00
OT-120015198		PMP	CR-PA-ME			
OT-120052053	CALIBRAR PIT-T1501-1 VALORES ERRONEOS (PA) PAUCARM	CME	CR-PA-IN	2/19/2012 1:00:00 PM		
OT-120052053	CALIBRAR PIT-T1501-1 VALORES ERRONEOS (PA) PAUCARM	CME	CR-PA-IN	2/19/2012 2:25:00 PM	314:35:00	1:25:00
OT-120071221	CAMBIO DE VALVULA 3/4 EN BOMBA P1501B	RRR	CR-PA-ME	3/3/2012 5:00:00 PM		
OT-120071221	CAMBIO DE VALVULA 3/4 EN BOMBA P1501B	RRR	CR-PA-ME	3/3/2012 6:00:00 PM	2965:00:00	1:00:00
	REVISION DE CAJA REDUCTORA LINEA SUCCION P-1501B (PA) LARAR			7/5/2012 7:00:00 AM		
OT-120225310		PBP	CR-PA-ME			
	REVISION DE CAJA REDUCTORA LINEA SUCCION P-1501B (PA) LARAR			7/5/2012 11:00:00 AM	93:00:00	4:00:00
OT-120225310		PBP	CR-PA-ME			
OT-120231653	LIMPIEZA DE FILTRO P-1501B (PA) REALF	PBP	CR-PA-ME	7/9/2012 8:00:00 AM		
OT-120231653	LIMPIEZA DE FILTRO P-1501B (PA) REALF	PBP	CR-PA-ME	7/9/2012 11:00:00 AM	2060:00:00	3:00:00
OT-120337017	MNT CME LIMPIEZA DE FILTROS DE BOMBA P-1501B/C/D (PA)	CME	CR-PA-ME	10/3/2012 7:00:00 AM		

OT-120337017	MNT CME LIMPIEZA DE FILTROS DE BOMBA P-1501B/C/D (PA)	CME	CR-PA-ME	10/3/2012 9:00:00 AM	1397:30:00	2:00:00
OT-120411999	P-1501B LIMPIEZA DE FILTRO (PA)	CME	CR-PA-ME	11/30/2012 2:30:00 PM		
OT-120411999	P-1501B LIMPIEZA DE FILTRO (PA)	CME	CR-PA-ME	11/30/2012 4:00:00 PM	1240:00:00	1:30:00
OT-130026856	MNT CMR LIMPIEZA DE STRAINER DE BOMBAS DE REINYECCION F-P1501B (PA)	CME	CR-PA-ME	1/21/2013 8:00:00 AM		
OT-130026856	MNT CMR LIMPIEZA DE STRAINER DE BOMBAS DE REINYECCION F-P1501B (PA)	CME	CR-PA-ME	1/21/2013 10:00:00 PM	1887:00:00	14:00:00
OT-130139583	MNT CME LIMPIEZA DE FILTROS DE LINEA DE SUCCION F-P1501B (PA)	CME	CR-PA-ME	4/10/2013 1:00:00 PM		
OT-130139583	MNT CME LIMPIEZA DE FILTROS DE LINEA DE SUCCION F-P1501B (PA)	CME	CR-PA-ME	4/10/2013 4:00:00 PM	39:00:00	3:00:00
OT-130130884	MONTAJE DE MEDIDOR DE FLUJO EN LINEA DE AGUA DE SELLOS BOMBAS DE INYECCION DESCARGA V-1609(PA)	PYT	CR-PA-IN	4/12/2013 7:00:00 AM		
OT-130160369	MONTAJE, INSTALACION DE RTDS EN LINEAS DE FLUJO DE AGUA DE SELLOS P-1501(PA) ANDRADED	PYT	CR-PA-IN	4/17/2013 7:30:00 AM	201:30:00	120:30:00
OT-130160369	MONTAJE, INSTALACION DE RTDS EN LINEAS DE FLUJO DE AGUA DE SELLOS P-1501(PA) ANDRADED	PYT	CR-PA-IN	4/25/2013 5:00:00 PM		
OT-130130884	MONTAJE DE MEDIDOR DE FLUJO EN LINEA DE AGUA DE SELLOS BOMBAS DE INYECCION DESCARGA V-1609(PA)	PYT	CR-PA-IN	5/18/2013 5:30:00 PM	325:30:00	552:30:00
OT-130210255	FILTRO SUCCION BOMBA P1501B	PMP	CR-PA-ME	6/1/2013 7:00:00 AM		
OT-130210255	FILTRO SUCCION BOMBA P1501B	PMP	CR-PA-ME	6/1/2013 8:00:00 AM	95:00:00	1:00:00
OT-130077375	INSTALAR CONTROLADOR DELTAV BOMBAS P-1501A/B (PA)	PYT	CR-PA-AEE	6/5/2013 7:00:00 AM		
OT-130077375	INSTALAR CONTROLADOR DELTAV BOMBAS P-1501A/B (PA)	PYT	CR-PA-AEE	6/6/2013 1:00:00 PM	3306:00:00	30:00:00
OT-130441239	LIMPIEZA DE STRAINER P-1501A/B (QUINGAJO-SOLISK)	PBP	CR-PA-ME	10/22/2013 7:00:00 AM		
OT-130441239	LIMPIEZA DE STRAINER P-1501A/B (QUINGAJO-SOLISK)	PBP	CR-PA-ME	10/22/2013 11:00:00 AM	0:30:00	4:00:00
OT-130441239	LIMPIEZA DE STRAINER P-1501A/B (QUINGAJO-SOLISK)	PBP	CR-PA-ME	10/22/2013 11:30:00 AM		
OT-130441239	LIMPIEZA DE STRAINER P-1501A/B (QUINGAJO-SOLISK)	PBP	CR-PA-ME	10/22/2013 11:45:00 AM	883:45:00	0:15:00
OT-130517119	REVISAR SEÑALES DEL PANEL BENTLY NEVADA DE BOMBA P-1501B (PA) PAUCARM	CMP	CR-PA-IN	11/28/2013 7:30:00 AM		
OT-130517119	REVISAR SEÑALES DEL PANEL BENTLY NEVADA DE BOMBA P-1501B (PA) PAUCARM	CMP	CR-PA-IN	11/28/2013 5:30:00 PM	2155:30:00	10:00:00
OT-140150040	MNT CMP CAMBIO DE VALVULA DE BOMBA P-1501B (PA) KLEVER. S	CMP	CR-PA-ME	2/26/2014 1:00:00 PM		
OT-140150040	MNT CMP CAMBIO DE VALVULA DE BOMBA P-1501B (PA) KLEVER. S	CMP	CR-PA-ME	2/26/2014 5:30:00 PM	2102:30:00	4:30:00
OT-140405950	INSTALACIÓN DE FLUJÓMETROS EN LA ENTRADA DE AGUA PARA ENFRIAMIENTO SELLOS P-1501B (PA) CARRERAJ	PYT	CR-PA-IN	5/25/2014 8:00:00 AM		
OT-140405950	INSTALACIÓN DE FLUJÓMETROS EN LA ENTRADA DE AGUA PARA ENFRIAMIENTO SELLOS P-1501B (PA) CARRERAJ	PYT	CR-PA-IN	5/26/2014 3:00:00 PM	167:00:00	31:00:00
OT-140434493	LIMPIEZA DE STRAINER DE LA P-1501B (PA) FABIAN .R	PMP	CR-PA-ME	6/2/2014 2:00:00 PM		

OT-140434493	LIMPIEZA DE STRAINER DE LA P-1501B (PA) FABIAN .R	PMP	CR-PA-ME	6/2/2014 3:00:00 PM	409:00:00	1:00:00
OT-140475062	CAMBIO DE MANOMETRO BOMBA DE INYECCION DE AGUA DE PRODUCCION P1501B (PA) SEGOVIAE	CMP	CR-PA-IN	6/19/2014 4:00:00 PM		
OT-140475062	CAMBIO DE MANOMETRO BOMBA DE INYECCION DE AGUA DE PRODUCCION P1501B (PA) SEGOVIAE	CMP	CR-PA-IN	6/19/2014 6:00:00 PM	182:30:00	2:00:00
OT-140558610	LIMPIEZA DE FILTRO BOMBA SULZER P-1501B (PA) KLEVER. S	PMP	CR-PA-ME	6/27/2014 8:30:00 AM		
OT-140558610	LIMPIEZA DE FILTRO BOMBA SULZER P-1501B (PA) KLEVER. S	PMP	CR-PA-ME	6/27/2014 10:00:00 AM	749:00:00	1:30:00
OT-140674772	LIMPIEZA DE FILTROS DE LA P-1501B (PA) KLEVER. S	PBP	CR-PA-ME	7/28/2014 3:00:00 PM		
OT-140674772	LIMPIEZA DE FILTROS DE LA P-1501B (PA) KLEVER. S	PBP	CR-PA-ME	7/29/2014 4:00:00 PM	957:30:00	25:00:00
OT-140793878	LIMPIEZA DE FILTROS DE LAS P-1501A/B (PA)LARAR.	PBP	CR-PA-ME	9/7/2014 1:30:00 PM		
OT-140793878	LIMPIEZA DE FILTROS DE LAS P-1501A/B (PA)LARAR.	PBP	CR-PA-ME	9/7/2014 4:30:00 PM	3061:30:00	3:00:00
OT-150056104	MNT CME REUBICACIÓN DE LA RTD DEL SELLO MECÁNICO DE LA BOMBA P-1501(PA) CARRERAJ	PYT	CR-PA-IN	1/13/2015 6:00:00 AM		
OT-150056104	MNT CME REUBICACIÓN DE LA RTD DEL SELLO MECÁNICO DE LA BOMBA P-1501(PA) CARRERAJ	PYT	CR-PA-IN	1/13/2015 6:00:00 PM	522:00:00	12:00:00
OT-150113789	DESMTAJE DE LA INSTRUMENTACIÓN DE LA SUCCIÓN DE LA BOMBA P-1501B POR REEMPLAZO DE SPOOL (PA) AGUILARR	PYT	CR-PA-IN	2/4/2015 12:00:00 PM		
OT-150113789	DESMTAJE DE LA INSTRUMENTACIÓN DE LA SUCCIÓN DE LA BOMBA P-1501B POR REEMPLAZO DE SPOOL (PA) AGUILARR	PYT	CR-PA-IN	2/4/2015 4:00:00 PM	736:00:00	4:00:00
OT-150250516	MNT PYT CONEXION MOTOR VENTILADOR NUEVA BOMBA SULZER P-B75209 (PA)	PYT	CR-PA-EL	3/7/2015 8:00:00 AM		
OT-150250516	MNT PYT CONEXION MOTOR VENTILADOR NUEVA BOMBA SULZER P-B75209 (PA)	PYT	CR-PA-EL	3/7/2015 10:00:00 AM	1558:25:00	2:00:00
OT-150468957	MNT REVISION DE VALVULA YARWAY P-1501 B QUINGAJO	PBP	CR-PA-ME	5/11/2015 8:25:00 AM		
OT-150468957	MNT REVISION DE VALVULA YARWAY P-1501 B QUINGAJO	PBP	CR-PA-ME	5/12/2015 2:00:00 PM	1207:30:00	29:35:00
OT-152229736	REVISION DE LIQUEO DE ACEITE POR COJINETE LADO LIBRE SULZER P-B75209	PBP	CR-PA-ME	7/1/2015 9:30:00 PM		
OT-152229736	REVISION DE LIQUEO DE ACEITE POR COJINETE LADO LIBRE SULZER P-B75210	PBP	CR-PA-ME	7/2/2015 10:45:00 PM	776:45:00	25:15:00
OT-152330123	LIMPIEZA DE FILTROS DE LA P-1501B (PA) XRODRIGUM	PBP	CR-PA-ME	8/4/2015 7:30:00 AM		
OT-152330123	LIMPIEZA DE FILTROS DE LA P-1501B (PA) XRODRIGUM	PBP	CR-PA-ME	8/4/2015 11:30:00 AM	676:00:00	4:00:00
OT-154004862	LIMPIEZA DE FILTROS DE LA P-1501B (PA)	CME	CR-PA-ME	9/1/2015 3:30:00 PM		
OT-154004862	LIMPIEZA DE FILTROS DE LA P-1501B (PA)	CME	CR-PA-ME	9/1/2015 8:30:00 PM	2198:00:00	5:00:00
OT-154357894	REVISION DE ALTA TEMPERATURA EN COJINETE LADO LIBRE P-1501B (CHAVEZB)	CME	CR-PA-ME	12/2/2015 10:30:00 AM		
OT-154357894	REVISION DE ALTA TEMPERATURA EN COJINETE LADO LIBRE P-1501B (CHAVEZB)	CME	CR-PA-ME	12/2/2015 10:50:00 AM	1680:00:00	0:20:00
OT-160132963	SETEO DE MEDIDOR DE FLUJO DE BOMBA P-1501B (P-B75209) CARRERAX	PYT	CR-PA-IN	2/10/2016 10:50:00 AM		
OT-160132963	SETEO DE MEDIDOR DE FLUJO DE BOMBA P-1501B (P-B75209) CA	PYT	CR-PA-IN	2/10/2016 1:30:00 PM	864:00:00	2:40:00

**Anexo C.** Listado de trabajos que implicaron Down Time en bomba P-1501C. Fuente: Maximo IBM 2011-2016, Petroamazonas  
EP -Autor

OT	DESCRIPCION	TIPO	AREA	FECHA	UT	DT
OT-120002442	LIMPIEZA DE LOS FILTROS DE SUCCION DE LAS BOMBAS P-1501E Y DE LA P-1501C, SOMBRERO DE BRUJA (PA)	CME	CR-PA-ME	1/9/2012 7:00:00 AM		
OT-120002442	LIMPIEZA DE LOS FILTROS DE SUCCION DE LAS BOMBAS P-1501E Y DE LA P-1501C, SOMBRERO DE BRUJA (PA)	CME	CR-PA-ME	1/9/2012 12:00:00 PM	43:00:00	5:00:00
OT-110321886	CAMBIO DE VALVULA DE BOLA EN SUCCION DE BOMBA P-1501C	CMP	CR-PA-ME	1/11/2012 7:00:00 AM		
OT-110321886	CAMBIO DE VALVULA DE BOLA EN SUCCION DE BOMBA P-1501C	CMP	CR-PA-ME	1/11/2012 12:00:00 PM	914:00:00	5:00:00
OT-120052052	REVISAR PIT-P1501C SE ENCUENTRA EN FALLA (PA) PAUCARM	CME	CR-PA-IN	2/18/2012 2:00:00 PM		
OT-120052052	REVISAR PIT-P1501C SE ENCUENTRA EN FALLA (PA) PAUCARM	CME	CR-PA-IN	2/18/2012 3:54:00 PM	375:06:00	1:54:00
OT-120073756	LIMPIEZA FILTRO P-1501C (PA)	CME	CR-PA-ME	3/5/2012 7:00:00 AM		
OT-120073756	LIMPIEZA FILTRO P-1501C (PA)	CME	CR-PA-ME	3/5/2012 9:00:00 AM	7:00:00	2:00:00
OT-120069026	LIMPIEZA FILTRO P-1501C (PA)	CME	CR-PA-ME	3/5/2012 4:00:00 PM		
OT-120069026	LIMPIEZA FILTRO P-1501C (PA)	CME	CR-PA-ME	3/5/2012 5:00:00 PM	69:00:00	1:00:00
OT-120077306	P-1501C LIMPIEZA DEL FILTRO SUCCION (PA)	CME	CR-PA-ME	3/8/2012 2:00:00 PM		
OT-120077306	P-1501C LIMPIEZA DEL FILTRO SUCCION (PA)	CME	CR-PA-ME	3/8/2012 6:00:00 PM	331:00:00	4:00:00
OT-120095666	LIMPIEZA DE FILTRO DE SUCCION HPS P-1501C (PA)	CME	CR-PA-ME	3/22/2012 1:00:00 PM		
OT-120095666	LIMPIEZA DE FILTRO DE SUCCION HPS P-1501C (PA)	CME	CR-PA-ME	3/22/2012 3:00:00 PM	952:00:00	2:00:00
OT-120142444	CAMBIO DE ACEITE EN MOTOR ELECTRICO MEP 1501C	PBP	CR-PA-EL	5/1/2012 7:00:00 AM		
OT-120142444	CAMBIO DE ACEITE EN MOTOR ELECTRICO MEP 1501C	PBP	CR-PA-EL	5/1/2012 9:00:00 AM	190:00:00	2:00:00
OT-120156170	LIMPIEZA DE FILTRO DE SUCCION DE P-1501C (PA)VELOZE	CME	CR-PA-ME	5/9/2012 7:00:00 AM		
OT-120156170	LIMPIEZA DE FILTRO DE SUCCION DE P-1501C (PA)VELOZE	CME	CR-PA-ME	5/9/2012 10:00:00 AM	142:00:00	3:00:00
OT-120165657	LIMPIEZA DE FILTRO DE SUCCION HPS P-1501C	CME	CR-PA-ME	5/15/2012 8:00:00 AM		

	(PA)CR-PA-MEH					
OT-120165735	DESCONEXION Y CONEXION DE 8 RTD-S Y ALIMENTACION DEL HEATER DEL MOTOR DE LA BOMBA P-1501C (PA)	PYT	CR-PA-IN	5/15/2012 9:00:00 AM	1:00:00	1:00:00
OT-120165657	LIMPIEZA DE FILTRO DE SUCCION HPS P-1501C (PA)CR-PA-MEH	CME	CR-PA-ME	5/15/2012 10:00:00 AM		
OT-120165735	DESCONEXION Y CONEXION DE 8 RTD-S Y ALIMENTACION DEL HEATER DEL MOTOR DE LA BOMBA P-1501C (PA)	PYT	CR-PA-IN	5/15/2012 4:25:00 PM	2636:35:00	6:25:00
OT-120299371	LIMPIEZA DE FILTROS EN BOMBAS DE INYECCION P-1501C P-1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	9/2/2012 1:00:00 PM		
OT-120299371	LIMPIEZA DE FILTROS EN BOMBAS DE INYECCION P-1501C P-1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	9/2/2012 3:00:00 PM	835:00:00	2:00:00
OT-120344331	MNT CME REVISION Y LIMPIEZA DE FILTRO DE P-1501C (PA)	CME	CR-PA-ME	10/7/2012 10:00:00 AM		
OT-120344331	MNT CME REVISION Y LIMPIEZA DE FILTRO DE P-1501C (PA)	CME	CR-PA-ME	10/7/2012 12:00:00 PM	1083:00:00	2:00:00
OT-120400364	LIMPIEZA DE STRAINER P-1501C (PA)	CME	CR-PA-ME	11/21/2012 3:00:00 PM		
OT-120400364	LIMPIEZA DE STRAINER P-1501C (PA)	CME	CR-PA-ME	11/21/2012 5:00:00 PM	194:00:00	2:00:00
OT-120412000	P-1501C LIMPIEZA FILTRO (PA)	CME	CR-PA-ME	11/29/2012 7:00:00 PM		
OT-120412000	P-1501C LIMPIEZA FILTRO (PA)	CME	CR-PA-ME	11/29/2012 8:30:00 PM	228:00:00	1:30:00
OT-120422663	MNT CME LIMPIEZA STRAINER P-1501C (PA)	CME	CR-PA-ME	12/9/2012 8:30:00 AM		
OT-120422663	MNT CME LIMPIEZA STRAINER P-1501C (PA)	CME	CR-PA-ME	12/9/2012 10:30:00 AM	458:30:00	2:00:00
OT-120446458	P-1501C LIMPIEZA DE FILTRO DE LINEA DE SUCCION	CME	CR-PA-ME	12/28/2012 1:00:00 PM		
OT-120446458	P-1501C LIMPIEZA DE FILTRO DE LINEA DE SUCCION	CME	CR-PA-ME	12/28/2012 2:00:00 PM	191:00:00	1:00:00
OT-130002911	LIMPIEZA DE FILTRO SOMBRERO DE BRUJO DE LAS P-1501C (PA)	CME	CR-PA-ME	1/5/2013 1:00:00 PM		
OT-130002911	LIMPIEZA DE FILTRO SOMBRERO DE BRUJO DE LAS P-1501C (PA)	CME	CR-PA-ME	1/5/2013 2:00:00 PM	185:00:00	1:00:00
OT-130014660	MNT CME LIMPIEZA DE FILTROS DE BOMBAS P-1501C Y P-1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	1/13/2013 7:00:00 AM		
OT-130014660	MNT CME LIMPIEZA DE FILTROS DE BOMBAS P-1501C Y P-1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	1/13/2013 10:00:00 AM	216:30:00	3:00:00
OT-130026857	MNT CME LIMPIEZA DE STRAINER DE BOMBAS DE REINYECCION F-P1501C (PA)	CME	CR-PA-ME	1/22/2013 10:30:00 AM		
OT-130026857	MNT CME LIMPIEZA DE STRAINER DE BOMBAS	CME	CR-PA-ME	1/22/2013 11:30:00 AM	691:30:00	1:00:00

	DE REINYECCION F-P1501C (PA)						
OT-130067263	MNT CME CAMBIO DE VALVULA CHECK 6X1500 Y SELLO MECANICO DE BOMBA P-1501C (PA)	CME	CR-PA-ME	2/20/2013 7:00:00 AM			
OT-130067263	MNT CME CAMBIO DE VALVULA CHECK 6X1500 Y SELLO MECANICO DE BOMBA P-1501C (PA)	CME	CR-PA-ME	2/20/2013 3:00:00 PM	689:00:00	8:00:00	
OT-130109869	MNT CME LMPIEZA DE FILTROS DE BOMBA F-P1501C (PA)	CME	CR-PA-ME	3/21/2013 8:00:00 AM			
OT-130109869	MNT CME LMPIEZA DE FILTROS DE BOMBA F-P1501C (PA)	CME	CR-PA-ME	3/21/2013 10:00:00 AM	165:00:00	2:00:00	
OT-130118915	P-1501C LIMPIEZA DE FILTRO (PA)	CME	CR-PA-ME	3/28/2013 7:00:00 AM			
OT-130118915	P-1501C LIMPIEZA DE FILTRO (PA)	CME	CR-PA-ME	3/28/2013 9:00:00 AM	360:30:00	2:00:00	
OT-130141879	MNT CME LIMPIEZA DE FILTROS DE F-P1501C (PA)	CME	CR-PA-ME	4/12/2013 9:30:00 AM			
OT-130141879	MNT CME LIMPIEZA DE FILTROS DE F-P1501C (PA)	CME	CR-PA-ME	4/12/2013 11:30:00 AM	212:30:00	2:00:00	
OT-130153323	MNT CME LIMPIEZA DE FILTROS DE BOMBAS INYECCION AGUA F-P1501C Y F-P1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	4/21/2013 8:00:00 AM			
OT-130153323	MNT CME LIMPIEZA DE FILTROS DE BOMBAS INYECCION AGUA F-P1501C Y F-P1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	4/21/2013 11:00:00 AM	740:00:00	3:00:00	
OT-130197135	CAMBIO DE VALVULAS CHECK EN RECIRCULACION EN P-1501C / P-1501D (PA)	CMP	CR-PA-ME	5/22/2013 7:00:00 AM			
OT-130197135	CAMBIO DE VALVULAS CHECK EN RECIRCULACION EN P-1501C / P-1501D (PA)	CMP	CR-PA-ME	5/22/2013 1:00:00 PM	138:00:00	6:00:00	
OT-130210256	FILTRO SUCCION BOMBA P1501C	PMP	CR-PA-ME	5/28/2013 7:00:00 AM			
OT-130210256	FILTRO SUCCION BOMBA P1501C	PMP	CR-PA-ME	5/28/2013 8:00:00 AM	14158:00:00	1:00:00	
OT-150022823	REVISION DE VALVULA DE CONTROL BOMBA DE REINYECCION DE AGUA P1501C(PA) CARRERAJ	CME	CR-PA-IN	1/8/2015 6:00:00 AM			
OT-150022823	REVISION DE VALVULA DE CONTROL BOMBA DE REINYECCION DE AGUA P1501C(PA) CARRERAJ	CME	CR-PA-IN	1/8/2015 6:00:00 PM	3186:00:00	12:00:00	
OT-150551366	MNT PYT CONTRUCCION CANASTA PARA FILTROS DE P-1501C / D (PA)PASCUMAM	PYT	CR-PA-ME	5/21/2015 12:00:00 PM			
OT-150551366	MNT PYT CONTRUCCION CANASTA PARA FILTROS DE P-1501C / D (PA)PASCUMAM	PYT	CR-PA-ME	5/21/2015 1:00:00 PM			

**Anexo D.** Listado de trabajos que implicaron Down Time en bomba P-1501D. Fuente: Maximo IBM 2011-2016, Petroamazonas  
EP -Autor

OT	DESCRIPCION	TIPO	AREA	FECHA	UT (horas)	DT (horas)
OT-110320799	LIMPIEZA DEL FILTRO SOMBRERO DE BRUJA DE LA BOMBA DE INYECCION DE AGUA P-1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	12/26/2011 8:00:00 AM		
OT-110320799	LIMPIEZA DEL FILTRO SOMBRERO DE BRUJA DE LA BOMBA DE INYECCION DE AGUA P-1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	12/26/2011 10:00:00 AM	1394:30:00	2:00:00
OT-120060380	APOYO A PERSONAL DE FIC EN DESCONEXION DE CABLE DE FUERZA Y HEATERS DE MOTOR DE BOMBA P-1501D (PA)	PYT	CR-PA-EL	2/22/2012 12:30:00 PM		
OT-120060380	APOYO A PERSONAL DE FIC EN DESCONEXION DE CABLE DE FUERZA Y HEATERS DE MOTOR DE BOMBA P-1501D (PA)	PYT	CR-PA-EL	2/22/2012 3:30:00 PM	63:30:00	3:00:00
OT-120061803	MONTAJE Y DESMONTAJE DE LA INSTRUMENTACION PARA CAMBIO DE MOTOR Y BOMBA P-1501D (PA) CHILLANJ	PYT	CR-PA-IN	2/25/2012 7:00:00 AM		
OT-120061803	MONTAJE Y DESMONTAJE DE LA INSTRUMENTACION PARA CAMBIO DE MOTOR Y BOMBA P-1501D (PA) CHILLANJ	PYT	CR-PA-IN	2/25/2012 9:00:00 AM	46:00:00	2:00:00
OT-120062774	DESCONEXION DE CABLES DE ALIMENTACION Y PRUEBAS DE ARRANQUE DE LA P-1501D (PA)	PYT	CR-PA-EL	2/27/2012 7:00:00 AM		
OT-120062774	DESCONEXION DE CABLES DE ALIMENTACION Y PRUEBAS DE ARRANQUE DE LA P-1501D (PA)	PYT	CR-PA-EL	2/27/2012 8:00:00 AM	119:00:00	1:00:00
OT-120070040	REVISAR PSV DE LA P-1501D ANDRADED	CMP	CR-PA-IN	3/3/2012 7:00:00 AM		
OT-120070040	REVISAR PSV DE LA P-1501D ANDRADED	CMP	CR-PA-IN	3/3/2012 11:30:00 AM	386:30:00	4:30:00
OT-120092068	LIMPIEZA DE FILTRO CONO DE BRUJA DE LA P-1501D (PA) (PAA)VELOZE	CME	CR-PA-ME	3/19/2012 2:00:00 PM		
OT-120092068	LIMPIEZA DE FILTRO CONO DE BRUJA DE LA P-1501D (PA) (PAA)VELOZE	CME	CR-PA-ME	3/19/2012 6:00:00 PM	69:00:00	4:00:00
OT-120095670	LIMPIEZA DE FILTRO DE SUCCION HPS P-1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	3/22/2012 3:00:00 PM		
OT-120095670	LIMPIEZA DE FILTRO DE SUCCION HPS P-1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	3/22/2012 5:00:00 PM	1289:00:00	2:00:00
OT-120165658	LIMPIEZA DE FILTRO DE SUCCION HPS P-1501D (PA) CR-PA-MEH	CME	CR-PA-ME	5/15/2012 10:00:00 AM		
OT-120165658	LIMPIEZA DE FILTRO DE SUCCION HPS P-1501D (PA) CR-PA-MEH	CME	CR-PA-ME	5/15/2012 12:00:00 PM	3500:00:00	2:00:00
OT-120344105	MNT CME LIQUEO EN LA DESCARGA DE BOMBA P-1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	10/8/2012 8:00:00 AM		
OT-120344105	MNT CME LIQUEO EN LA DESCARGA DE BOMBA P-1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	10/9/2012 11:00:00 AM	1038:00:00	27:00:00
OT-120400366	LIMPIEZA DE STRAINER P-1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	11/21/2012 5:00:00 PM		
OT-120400366	LIMPIEZA DE STRAINER P-1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	11/21/2012 7:00:00 PM	193:30:00	2:00:00
OT-120412001	P-1501D LIMPIEZA FILTRO (PA)	CME	CR-PA-ME	11/29/2012 8:30:00 PM		
OT-120412001	P-1501D LIMPIEZA FILTRO (PA)	CME	CR-PA-ME	11/30/2012 2:30:00 PM	214:30:00	18:00:00
OT-120422664	MNT CME LIMPIEZA STRAINER P-1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	12/9/2012 1:00:00 PM		
OT-120422664	MNT CME LIMPIEZA STRAINER P-1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	12/9/2012 3:00:00 PM	455:00:00	2:00:00
OT-120446461	P-1501D LIMPIEZA FILTRO (PA)	CME	CR-PA-ME	12/28/2012 2:00:00 PM		



OT-120446461	P-1501D LIMPIEZA FILTRO (PA)	CME	CR-PA-ME	12/28/2012 3:00:00 PM	191:00:00	1:00:00
OT-130002912	LIMPIEZA DE FILTRO SOMBRERO DE BRUJO DE LAS P-1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	1/5/2013 2:00:00 PM		
OT-130002912	LIMPIEZA DE FILTRO SOMBRERO DE BRUJO DE LAS P-1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	1/5/2013 3:00:00 PM	305:00:00	1:00:00
OT-130021585	MNT CME LIMPIEZA DE FILTROS DE BOMBAS F-P1501E F-P1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	1/18/2013 8:00:00 AM		
OT-130021585	MNT CME LIMPIEZA DE FILTROS DE BOMBAS F-P1501E F-P1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	1/18/2013 9:00:00 AM	264:00:00	1:00:00
OT-130035440	LIMPIEZA DEL FILTRO DE LA BOMBA P-1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	1/29/2013 9:00:00 AM		
OT-130035440	LIMPIEZA DEL FILTRO DE LA BOMBA P-1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	1/29/2013 11:00:00 AM	861:00:00	2:00:00
OT-130085136	REVISION DEL TRANSMISOR PIT-P1501D-2 (PA)	CME	CR-PA-IN	3/6/2013 8:00:00 AM		
OT-130085136	REVISION DEL TRANSMISOR PIT-P1501D-2 (PA)	CME	CR-PA-IN	3/7/2013 4:30:00 PM	329:30:00	32:30:00
OT-130109875	MNT CME LMPIEZA DE FILTROS DE BOMBA F-P1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	3/21/2013 10:00:00 AM		
OT-130109875	MNT CME LMPIEZA DE FILTROS DE BOMBA F-P1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	3/21/2013 12:00:00 PM	457:00:00	2:00:00
OT-130138747	MNT CME LIMPIEZA DE FILTROS DE LINEA DE SUCCION F-P1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	4/9/2013 1:00:00 PM		
OT-130138747	MNT CME LIMPIEZA DE FILTROS DE LINEA DE SUCCION F-P1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	4/9/2013 3:00:00 PM	281:00:00	2:00:00
OT-130153323	MNT CME LIMPIEZA DE FILTROS DE BOMBAS INYECCION AGUA F-P1501C Y F-P1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	4/21/2013 8:00:00 AM		
OT-130153323	MNT CME LIMPIEZA DE FILTROS DE BOMBAS INYECCION AGUA F-P1501C Y F-P1501D (PA)	CME	CR-PA-ME	4/21/2013 11:00:00 AM	740:00:00	3:00:00
OT-130197135	CAMBIO DE VALVULAS CHECK EN RECIRCULACION EN P-1501C / P-1501D (PA)	CMP	CR-PA-ME	5/22/2013 7:00:00 AM		
OT-130197135	CAMBIO DE VALVULAS CHECK EN RECIRCULACION EN P-1501C / P-1501D (PA)	CMP	CR-PA-ME	5/22/2013 1:00:00 PM	190:00:00	6:00:00
OT-130210257	FILTRO SUCCION BOMBA P1501D	PMP	CR-PA-ME	5/30/2013 11:00:00 AM		
OT-130210257	FILTRO SUCCION BOMBA P1501D	PMP	CR-PA-ME	5/30/2013 12:00:00 PM	9523:00:00	1:00:00
OT-140568955	CHEQUEO DE VALVULA DE LA SUCCION DE P-1501D (PA) KLEVER. S	CME	CR-PA-ME	7/1/2014 7:00:00 AM		
OT-140568955	CHEQUEO DE VALVULA DE LA SUCCION DE P-1501D (PA) KLEVER. S	CME	CR-PA-ME	7/1/2014 9:00:00 AM	4588:30:00	2:00:00
OT-150022825	REVISION DE VALVULA DE CONTROL DE BOMBA DE REINYECCION DE AGUA P1501D (PA) CARRERAJ	CME	CR-PA-IN	1/8/2015 1:30:00 PM		
OT-150022825	REVISION DE VALVULA DE CONTROL DE BOMBA DE REINYECCION DE AGUA P1501D (PA) CARRERAJ	CME	CR-PA-IN	1/8/2015 3:00:00 PM	3999:00:00	1:30:00
OT-150680674	MNT INSTALACIÓN LINEAS DE VENTEO EN FILTROS P-1501D (PA)	PYT	CR-PA-IN	6/24/2015 6:00:00 AM		
OT-150680674	MNT INSTALACIÓN LINEAS DE VENTEO EN FILTROS P-1501D (PA)	PYT	CR-PA-IN	6/24/2015 11:30:00 AM		

**Anexo E.** Listado de trabajos que implicaron Down Time en bomba P-1501E. Fuente: Maximo IBM 2011-2016, Petroamazonas  
EP -Autor

OT	DESCRIPCION	TIPO	AREA	FECHA	UT (horas)	DT(horas)
OT-120082136	RRR MONTAJE DE NUEVO MOTOR ELECTRICO QUE ARRIBA DE B12 EN BOMBA P-1501E	RRR	CR-PA-EL	3/28/2011 9:25:00 PM		
OT-120082136	RRR MONTAJE DE NUEVO MOTOR ELECTRICO QUE ARRIBA DE B12 EN BOMBA P-1501E	RRR	CR-PA-EL	4/12/2011 9:25:00 AM	1021:40:00	348:00:00
OT-120087092	REVISION CAMBIO DE TRANSMISOR DE PRESION DE SUCCION P-1501E	CME	CR-PA-IN	5/24/2011 11:05:00 PM		
OT-120087092	REVISION CAMBIO DE TRANSMISOR DE PRESION DE SUCCION P-1501E	CME	CR-PA-IN	5/25/2011 8:45:00 AM	1315:15:00	9:40:00
OT-120118520	CAMBIO DE SELLO MECANICO DE BOMBA P-1501E	CME	CR-PA-ME	7/19/2011 4:00:00 AM		
OT-120118520	CAMBIO DE SELLO MECANICO DE BOMBA P-1501E	CME	CR-PA-ME	7/20/2011 8:00:00 PM	2105:00:00	40:00:00
OT-120153600	MONTAJE DE OIL COOLER P-1501 E (PA) LARAR/RAMOSF	PYT	CR-PA-ME	10/16/2011 1:00:00 PM		
OT-120153600	MONTAJE DE OIL COOLER P-1501 E (PA) LARAR/RAMOSF	PYT	CR-PA-ME	10/16/2011 3:00:00 PM	39:00:00	2:00:00
OT-120146274	DESCONEXION MECANICA DE P-1501E (PA) CHAVEZB/RAMOSF/LARAR	CME	CR-PA-ME	10/18/2011 6:00:00 AM		
OT-120146274	DESCONEXION MECANICA DE P-1501E (PA) CHAVEZB/RAMOSF/LARAR	CME	CR-PA-ME	10/18/2011 12:00:00 PM	838:00:00	6:00:00
OT-120069027	MONTAJE DE SPOOL DE P-1501E (PA) REALF/PAZMINOD	PYT	CR-PA-ME	11/22/2011 10:00:00 AM		
OT-120069027	MONTAJE DE SPOOL DE P-1501E (PA) REALF/PAZMINOD	PYT	CR-PA-ME	11/22/2011 4:00:00 PM	18:00:00	6:00:00
OT-130054675	MONTAJE MECANICO DE LA BOMBA P-1501E (PA)	PYT	CR-PA-ME	11/23/2011 10:00:00 AM		
OT-130054675	MONTAJE MECANICO DE LA BOMBA P-1501E (PA)	PYT	CR-PA-ME	11/23/2011 6:00:00 PM	661:00:00	8:00:00
OT-110245089	DESMONTAJE Y MONTAJE DE SPOOL DE DESCARGA P- 1501E (PA)	PYT	CR-PA-ME	12/21/2011 7:00:00 AM		
OT-110245089	DESMONTAJE Y MONTAJE DE SPOOL DE DESCARGA P- 1501E (PA)	PYT	CR-PA-ME	12/23/2011 4:00:00 PM	256:00:00	57:00:00
OT-110248618	LIMPIEZA DE FILTROS DE SUCCION DE LA P-1501E (PA)RAMOSF/LARAR	CME	CR-PA-ME	1/3/2012 8:00:00 AM		
OT-110248618	LIMPIEZA DE FILTROS DE SUCCION DE LA P-1501E (PA)RAMOSF/LARAR	CME	CR-PA-ME	1/3/2012 10:00:00 AM	1389:00:00	2:00:00
OT-110283866	LIMPIEZA FILTRO B DE LA P-1501E (PA)	CME	CR-PA-ME	3/1/2012 7:00:00 AM		
OT-110283866	LIMPIEZA FILTRO B DE LA P-1501E (PA)	CME	CR-PA-ME	3/1/2012 8:00:00 PM	60:00:00	13:00:00
OT-110286051	PSV-1501D-1 INSPECTION (PA)	PMP	CR-PA-TIM	3/4/2012 8:00:00 AM		

OT-110286051	PSV-1501D-1 INSPECTION (PA)	PMP	CR-PA-TIM	3/4/2012 4:30:00 PM	432:30:00	8:30:00
OT-110316065	LIMPIEZA DE FILTRO DE SUCCION HPS P-1501E (PA)	CME	CR-PA-ME	3/22/2012 5:00:00 PM		
OT-110316065	LIMPIEZA DE FILTRO DE SUCCION HPS P-1501E (PA)	CME	CR-PA-ME	3/22/2012 6:00:00 PM	379:00:00	1:00:00
OT-110331245	CAMBIO DE VALVULA EN LINEA DE RECIRCULACION P-1501E (PA)	CME	CR-PA-ME	4/7/2012 1:00:00 PM		
OT-110331245	CAMBIO DE VALVULA EN LINEA DE RECIRCULACION P-1501E (PA)	CME	CR-PA-ME	4/10/2012 6:00:00 PM	566:00:00	77:00:00
OT-120080814	LIMPIEZA FILTRO F-P1501E-1 DE LA BOMBA P-1501E (PA) (MEC)	CMP	CR-PA-ME	5/4/2012 8:00:00 AM		
OT-120080814	LIMPIEZA FILTRO F-P1501E-1 DE LA BOMBA P-1501E (PA) (MEC)	CMP	CR-PA-ME	5/5/2012 12:00:00 PM	141:00:00	28:00:00
OT-120095668	LIMPIEZA DE FILTRO DE SUCCION DE P-1501E (PA)LARAR/PAZMINOD	CME	CR-PA-ME	5/11/2012 9:00:00 AM		
OT-120095668	LIMPIEZA DE FILTRO DE SUCCION DE P-1501E (PA)LARAR/PAZMINOD	CME	CR-PA-ME	5/13/2012 11:00:00 AM	26:00:00	50:00:00
OT-120116781	LIMPIEZA DE FILTRO DE SUCCION HPS P-1501E (PA)CR-PA-MEH	CME	CR-PA-ME	5/14/2012 1:00:00 PM		
OT-120116781	LIMPIEZA DE FILTRO DE SUCCION HPS P-1501E (PA)CR-PA-MEH	CME	CR-PA-ME	5/14/2012 2:00:00 PM	19:40:00	1:00:00
OT-120157728	INSTALACION DE LINEAS DE TUBING PARA DRENAJE DE AGUA DE SELLOS P-1501E (PA)	PYT	CR-PA-IN	5/15/2012 9:40:00 AM		
OT-120157728	INSTALACION DE LINEAS DE TUBING PARA DRENAJE DE AGUA DE SELLOS P-1501E (PA)	PYT	CR-PA-IN	5/15/2012 11:50:00 AM	355:10:00	2:10:00
OT-120165659	REVISION PARA LIMPIEZA INTERNA DEL FT-P1501E-1 (PA)	CMP	CR-PA-IN	5/30/2012 7:00:00 AM		
OT-120165659	REVISION PARA LIMPIEZA INTERNA DEL FT-P1501E-1 (PA)	CMP	CR-PA-IN	6/4/2012 9:00:00 AM	1421:00:00	122:00:00
OT-120165709	REPARACION DE BOMBA P-1501E (PA)	CME	CR-PA-ME	8/2/2012 2:00:00 PM		
OT-120165709	REPARACION DE BOMBA P-1501E (PA)	CME	CR-PA-ME	8/2/2012 8:25:00 PM	952:35:00	6:25:00
OT-120260938	REVISION DE LAS SENALES DE TEMPERATURA DE LA BOMBA P-1501E (PA)	CME	CR-PA-IN	9/11/2012 1:00:00 PM		
OT-120260938	REVISION DE LAS SENALES DE TEMPERATURA DE LA BOMBA P-1501E (PA)	CME	CR-PA-IN	9/11/2012 6:00:00 PM	112:00:00	5:00:00
OT-120310889	CAMBIO DE MANOMETRO DEL SISTEMA DE LUBRICACION DE LA BOMBA P-1501E (PA) CARRERAJ	CME	CR-PA-IN	9/16/2012 10:00:00 AM		
OT-120310889	CAMBIO DE MANOMETRO DEL SISTEMA DE LUBRICACION DE LA BOMBA P-1501E (PA) CARRERAJ	CME	CR-PA-IN	9/23/2012 11:30:00 AM	2211:30:00	169:30:00

OT-120311986	MNT CME MANTENIMIENTO CORRECTIVO DE VALVULA DE AGUJA DE BOMBA P-1501E (PA)	CME	CR-PA-ME	12/24/2012 3:00:00 PM		
OT-120311986	MNT CME MANTENIMIENTO CORRECTIVO DE VALVULA DE AGUJA DE BOMBA P-1501E (PA)	CME	CR-PA-ME	12/24/2012 4:00:00 PM	1149:00:00	1:00:00
OT-130183002	DESMONTAJE DE CUBIERTAS PARA INSPECCION COJINETES MEP-P1501E (PA)	CME	CR-PA-ME	2/10/2013 1:00:00 PM		
OT-130183002	DESMONTAJE DE CUBIERTAS PARA INSPECCION COJINETES MEP-P1501E (PA)	CME	CR-PA-ME	2/14/2013 3:00:00 PM	2033:00:00	98:00:00
OT-130571588	MNT PBP ALINEACION DE BOMBA P-1501E (PA)	PMP	CR-PA-ME	5/10/2013 8:00:00 AM		
OT-130571588	MNT PBP ALINEACION DE BOMBA P-1501E (PA)	PMP	CR-PA-ME	5/10/2013 11:00:00 AM	5156:00:00	3:00:00
OT-140347538	MNT RRR MANTENIMIENTO CAMBIO PARCIAL BOMBA P-1501E POR GENERAL ELECTRIC (PA)	RRR	CR-PA-ME	12/11/2013 7:00:00 AM		
OT-140347538	MNT RRR MANTENIMIENTO CAMBIO PARCIAL BOMBA P-1501E POR GENERAL ELECTRIC (PA)	RRR	CR-PA-ME	12/18/2013 4:00:00 PM	3135:00:00	177:00:00
OT-150192978	CAMBIO DE ULTIMAS ETAPAS DE BOMBA POR GARANTIA P-1501E (PA) JOSE. Q	RRR	CR-PA-ME	4/28/2014 7:00:00 AM		
OT-150192978	CAMBIO DE ULTIMAS ETAPAS DE BOMBA POR GARANTIA P-1501E (PA) JOSE. Q	RRR	CR-PA-ME	4/28/2014 4:00:00 PM	6831:00:00	9:00:00
OT-150360720	MNT CME UBICACIÓN Y MONTAJE DE TRANSMISORES DE VIBRACIÓN Y TEMPERATURA EN BOMBA DE INYECCIÓN P-1501E (PA) CABEZASW	PYT	CR-PA-IN	2/7/2015 7:00:00 AM		
OT-150360720	REVISAR VALVULA DE RECIRCULACION P-1501 E (PA) CARRERAJ	CME	CR-PA-IN	2/8/2015 6:00:00 AM	12:00:00	23:00:00
OT-150393441	REVISAR VALVULA DE RECIRCULACION P-1501 E (PA) CARRERAJ	CME	CR-PA-IN	2/8/2015 6:00:00 PM		
OT-150393441	MNT CME UBICACIÓN Y MONTAJE DE TRANSMISORES DE VIBRACIÓN Y TEMPERATURA EN BOMBA DE INYECCIÓN P-1501E (PA) CABEZASW	PYT	CR-PA-IN	3/4/2015 2:45:00 PM	736:15:00	572:45:00
OT-150715192	CAMBIO DE SELLO MECANICO DE BOMBA P-1501E (PA)(RODRIGUEZM)	CMP	CR-PA-ME	4/4/2015 7:00:00 AM		
OT-150715192	CAMBIO DE SELLO MECANICO DE BOMBA P-1501E (PA)(RODRIGUEZM)	CMP	CR-PA-ME	4/4/2015 5:00:00 PM	110:00:00	10:00:00
OT-120421899	MNT CMP REVISION DE CUERPOS, GIRO, NIVELES DE VIBRACIÓN, PRUEB AFUNCIONAL DE BOMBA P-1501E (PA) (RODRIGUEZM)	CMP	CR-PA-ME	4/9/2015 7:00:00 AM		
OT-120421899	MNT CMP REVISION DE CUERPOS, GIRO, NIVELES DE VIBRACIÓN, PRUEB AFUNCIONAL DE BOMBA P-1501E (PA) (RODRIGUEZM)	CMP	CR-PA-ME	4/18/2015 7:00:00 AM	1879:30:00	216:00:00

OT-150149895	MNT PYT TRABAJOS PARA INSTALACIÓN DE BOMBA REPARADA P-1501E (INS) (PA) MATANGOD	PYT	CR-PA-IN	7/5/2015 2:30:00 PM		
OT-150149895	MNT PYT TRABAJOS PARA INSTALACIÓN DE BOMBA REPARADA P-1501E (INS) (PA) MATANGOD	PYT	CR-PA-IN	7/6/2015 6:00:00 PM	2232:00:00	27:30:00
OT-150223314	REVISION DE SOPORTES DE CUERPOS DE BOMBA P-1501E POR ALTA VIBRACION	PMP	CR-PA-ME	10/7/2015 6:00:00 PM		
OT-150223314	REVISION DE SOPORTES DE CUERPOS DE BOMBA P-1501E POR ALTA VIBRACION	PMP	CR-PA-ME	11/2/2015 6:00:00 PM	335:00:00	624:00:00
OT-150149895	ALINEACION CON LASER DE CUERPOS DE BOMBA P-1501E	PBP	CR-PA-ME	11/16/2015 5:00:00 PM		
OT-150149895	ALINEACION CON LASER DE CUERPOS DE BOMBA P-1501E	PBP	CR-PA-ME	12/12/2015 8:00:00 AM	435:20:00	615:00:00
OT-150172208	REPARACION DE STRAINERS EN SUCCION DE BOMBA P-1501 E	CME	CR-PA-ME	12/30/2015 11:20:00 AM		
OT-150172208	REPARACION DE STRAINERS EN SUCCION DE BOMBA P-1501 E	CME	CR-PA-ME	12/31/2015 7:20:00 AM	1105:05:00	20:00:00
OT-160065781	MODIFICACION DE PLAN API DE SELLO MECANICO P-1501 E	PYT	CR-PA-ME	2/15/2016 8:25:00 AM		
OT-160065781	MODIFICACION DE PLAN API DE SELLO MECANICO P-1501 E	PYT	CR-PA-ME	2/15/2016 4:25:00 PM	841:35:00	8:00:00
				3/21/2016 6:00:00 PM		

## Anexo F Cálculos de la Linealización de la Distribución de la No Confiabilidad de la bomba P-1501A.

j	t <sub>j</sub>	M(t <sub>j</sub> )	Y <sub>j</sub> ln(-ln(1-F(t <sub>j</sub> )))	X <sub>j</sub> ln(t <sub>j</sub> )	X <sub>j</sub> ·Y <sub>j</sub>	X <sub>j</sub> <sup>2</sup>	Ŷ <sub>j</sub>	Y <sub>j</sub> -Ŷ <sub>j</sub>	X <sub>j</sub> ·X <sub>media</sub>	[X <sub>j</sub> ·X <sub>media</sub> ] <sup>2</sup>	Y <sub>j</sub> -Y <sub>media</sub>	(X <sub>j</sub> -X <sub>media</sub> )(Y <sub>j</sub> -Y <sub>media</sub> )	[Y <sub>j</sub> -Y <sub>media</sub> ] <sup>2</sup>	[Y-Ŷ] <sup>2</sup>
1	0,5	0,03125	-3,44904	-0,69315	2,39129	0,48045	-2,54859	-0,90131	-3,02763	9,16654	-2,92583	8,85833	8,56048	0,81237
2	1,0	0,06250	-2,740493	0,00000	0,00000	0,00000	-2,08510	-0,65540	-2,33448	5,44981	-2,21642	5,17419	4,91251	0,42955
3	1,4	0,09375	-2,318307	0,34359	-0,79655	0,11805	-1,85534	-0,46296	-1,99089	3,96365	-1,79423	3,57213	3,21927	0,21434
4	1,5	0,12500	-2,013419	0,40647	-0,81637	0,16440	-1,81397	-0,19945	-1,92902	3,72111	-1,48934	2,87297	2,21815	0,03978
5	1,9	0,15625	-1,772551	0,64710	-1,14702	0,41874	-1,65239	-0,12016	-1,68738	2,84725	-1,24848	2,10665	1,55869	0,01444
6	2,0	0,18750	-1,571953	0,69315	-1,08959	0,48045	-1,62160	0,04965	-1,64134	2,69398	-1,04788	1,71992	1,09805	0,00247
7	2,3	0,21875	-1,398934	0,85015	-1,18930	0,72276	-1,51662	0,11768	-1,48433	2,20324	-0,87486	1,29858	0,76538	0,01385
8	3,0	0,25000	-1,245899	1,09861	-1,36876	1,20695	-1,35048	0,10458	-1,23587	1,52738	-0,72183	0,89208	0,52103	0,01094
9	3,6	0,28125	-1,107931	1,27536	-1,41301	1,62655	-1,23229	0,12436	-1,05912	1,12173	-0,58386	0,61837	0,34089	0,01546
10	4,0	0,31250	-0,981647	1,38629	-1,36085	1,92181	-1,15811	0,17646	-0,94819	0,89906	-0,45757	0,43387	0,20937	0,03114
11	4,5	0,34375	-0,864616	1,50408	-1,30045	2,26225	-1,07935	0,21473	-0,83041	0,68957	-0,34054	0,28279	0,11597	0,04611
12	5,0	0,37500	-0,755015	1,60944	-1,21515	2,59029	-1,00890	0,25388	-0,72504	0,52569	-0,23094	0,16744	0,05333	0,06446
13	5,0	0,40625	-0,651435	1,60944	-1,04844	2,59029	-1,00890	0,35746	-0,72504	0,52569	-0,12736	0,09234	0,01622	0,12778
14	6,0	0,43750	-0,552752	1,79176	-0,99040	3,21040	-0,88698	0,33423	-0,54272	0,29455	-0,02868	0,01556	0,00082	0,11171
15	6,0	0,46875	-0,458039	1,79176	-0,82070	3,21040	-0,88698	0,42894	-0,54272	0,29455	0,06603	-0,03584	0,00436	0,18399
16	6,0	0,50000	-0,366513	1,79176	-0,65670	3,21040	-0,88698	0,52047	-0,54272	0,29455	0,15756	-0,08551	0,02483	0,27089
17	8,5	0,53190	-0,275657	2,14007	-0,58992	4,57988	-0,65408	0,37842	-0,19442	0,03780	0,24842	-0,04830	0,06171	0,14320
18	10,0	0,56380	-0,186746	2,30259	-0,43000	5,30190	-0,54540	0,35866	-0,03190	0,00102	0,33733	-0,10176	0,11379	0,12864
19	14,0	0,59570	-0,099160	2,63906	-0,26169	6,96462	-0,32041	0,22125	0,30457	0,09277	0,42491	0,12942	0,18055	0,04895
20	18,0	0,62760	-0,012288	2,89037	-0,03552	8,35425	-0,15236	0,14007	0,55589	0,30901	0,51179	0,28450	0,26192	0,01962
21	18,5	0,67950	0,129161	2,91777	0,37686	8,51339	-0,13404	0,26320	0,58329	0,34022	0,65323	0,38102	0,42672	0,06928
22	32,0	0,69150	0,162147	3,46574	0,56196	12,01133	0,23237	-0,07022	1,13125	1,27973	0,68622	0,77629	0,47090	0,00493
23	36,0	0,72340	0,250901	3,58352	0,89911	12,84161	0,31113	-0,06023	1,24904	1,56009	0,77498	0,96797	0,60059	0,00363
24	39,5	0,75530	0,341973	3,67630	1,25720	13,51519	0,37317	-0,03120	1,34182	1,80048	0,86605	1,16208	0,75004	0,00097
25	55,3	0,78720	0,436578	4,01187	1,75149	16,09509	0,59756	-0,16098	1,67739	2,81362	0,96065	1,61138	0,92285	0,02592
26	61,0	0,81910	0,536383	4,11087	2,20500	16,89928	0,66376	-0,12738	1,77639	3,15557	1,06046	1,88379	1,12457	0,01623
27	74,0	0,85100	0,643857	4,30407	2,77120	18,52498	0,79295	-0,14909	1,96958	3,87925	1,16793	2,30034	1,36406	0,02223
28	107,0	0,88280	0,762614	4,67283	3,56357	21,83533	1,03953	-0,27692	2,33835	5,46786	1,28669	3,00872	1,65557	0,07668
29	170,0	0,91470	0,900804	5,13580	4,62635	26,37643	1,34911	-0,44831	2,80132	7,84737	1,42488	3,99153	2,30028	0,20098
30	180,0	0,94650	1,074345	5,19296	5,57903	26,96680	1,38733	-0,31298	2,85847	8,17087	1,59842	4,56904	2,55494	0,09796
31	185,0	0,97790	1,338201	5,22036	6,98588	27,25211	1,40655	-0,06745	2,88587	8,32826	1,86227	5,37429	3,46807	0,00455
SUMA					16,438496	250,246386	-16,246295	0,000000	0,000000	81,302292	0,000000	54,365192	39,605912	3,253012

## ANEXO F. Cálculos de la Linealización de la Distribución de la No Confiabilidad de la bomba P-1501B

j	t <sub>j</sub>	F(t <sub>j</sub> )	Y <sub>j</sub> ln(-ln(1-F(t <sub>j</sub> )))	X <sub>j</sub> ln(t <sub>j</sub> )	X <sub>j</sub> *Y <sub>j</sub>	X <sub>j</sub> <sup>2</sup>	Ŷ <sub>j</sub>	[Y <sub>j</sub> -Ŷ <sub>j</sub> ]	X <sub>j</sub> -X <sub>media</sub>	[X <sub>j</sub> -X <sub>media</sub> ] <sup>2</sup>	Y <sub>j</sub> -Y <sub>media</sub>	(X <sub>j</sub> -X <sub>media</sub> )*(Y <sub>j</sub> -Y <sub>media</sub> )	[Y <sub>j</sub> -Y <sub>media</sub> ] <sup>2</sup>	[Y-Ŷ] <sup>2</sup>
1	167,0	0,03030	-3,481161	5,11799	-17,81656	26,19386	-3,21950	-0,26166	-1,83867	3,38070	-2,95416	5,43171	8,72704	0,06846
2	182,5	0,06061	-2,772263	5,20675	-14,43448	27,11025	-3,08953	0,31727	-1,74991	3,06219	-2,24526	3,92900	5,04118	0,10066
3	314,6	0,09091	-2,350619	5,75124	-13,51897	33,07674	-2,29220	-0,05842	-1,20542	1,45305	-1,82361	2,19823	3,32557	0,00341
4	409,0	0,12121	-2,046303	6,01372	-12,30588	36,16477	-1,90783	-0,13847	-0,94295	0,88915	-1,51930	1,43262	2,30826	0,01917
5	420,5	0,15152	-1,806043	6,04144	-10,91111	36,49905	-1,86723	-0,06118	-0,91522	0,83762	-1,27904	1,17060	1,63594	0,00374
6	522,0	0,18182	-1,606090	6,25767	-10,05038	39,15840	-1,55060	-0,05549	-0,69899	0,48859	-1,07908	0,75427	1,16442	0,00308
7	672,0	0,21212	-1,433759	6,51026	-9,33414	42,38346	-1,18071	-0,25305	-0,44640	0,19928	-0,90675	0,40478	0,82220	0,06404
8	676,0	0,24242	-1,281460	6,51619	-8,35024	42,46077	-1,17202	-0,10944	-0,44047	0,19401	-0,75445	0,33231	0,56920	0,01198
9	689,0	0,27273	-1,144278	6,53524	-7,47813	42,70938	-1,14412	-0,00015	-0,42142	0,17760	-0,61727	0,26013	0,38103	0,00000
10	736,0	0,30303	-1,018840	6,60123	-6,72560	43,57624	-1,04749	0,02865	-0,35543	0,12633	-0,49183	0,17481	0,24190	0,00082
11	749,0	0,33333	-0,902720	6,61874	-5,97487	43,80771	-1,02185	0,11913	-0,33792	0,11419	-0,37572	0,12696	0,14116	0,01419
12	776,8	0,36364	-0,794106	6,65512	-5,28487	44,29060	-0,96858	0,17447	-0,30154	0,09093	-0,26710	0,08054	0,07134	0,03044
13	864,0	0,39394	-0,691598	6,76157	-4,67629	45,71887	-0,81269	0,12109	-0,19509	0,03806	-0,16459	0,03211	0,02709	0,01466
14	883,8	0,42424	-0,594083	6,78417	-4,03036	46,02502	-0,77959	0,18551	-0,17249	0,02975	-0,06708	0,01157	0,00450	0,03441
15	957,5	0,45455	-0,500651	6,86433	-3,43663	47,11897	-0,66222	0,16157	-0,09234	0,00853	0,02635	-0,00243	0,00069	0,02610
16	1128,5	0,48485	-0,410537	7,02864	-2,88552	49,40184	-0,42160	0,01106	0,07198	0,00518	0,11647	0,00038	0,01356	0,00012
17	1207,5	0,51515	-0,323076	7,09631	-2,29265	50,35758	-0,32251	-0,00056	0,13965	0,01950	0,20393	0,02848	0,04159	0,00000
18	1240,0	0,54640	-0,235040	7,12287	-1,67416	50,73523	-0,28362	0,04858	0,16620	0,02762	0,29197	0,04853	0,08524	0,00236
19	1397,5	0,57730	-0,149553	7,24244	-1,08313	52,45294	-0,10852	-0,04103	0,28578	0,08167	0,37745	0,10787	0,14247	0,00168
20	1558,0	0,60820	-0,065068	7,35116	-0,47832	54,03953	0,05068	-0,11575	0,39450	0,15563	0,46194	0,18223	0,21339	0,01340
21	1625,6	0,63920	0,019245	7,39362	0,14229	54,66562	0,11286	-0,09362	0,43696	0,19093	0,54625	0,23869	0,29839	0,00876
22	1627,0	0,67010	0,103428	7,39449	0,76480	54,67853	0,11414	-0,01072	0,43783	0,19170	0,63043	0,27602	0,39745	0,00011
23	1680,0	0,70100	0,188396	7,42655	1,39913	55,15363	0,16109	0,02731	0,46989	0,22079	0,71540	0,33616	0,51180	0,00075
24	2060,0	0,73190	0,274897	7,63046	2,09759	58,22394	0,45969	-0,18479	0,67380	0,45401	0,80190	0,54032	0,64305	0,03415
25	2102,5	0,76280	0,363845	7,65088	2,78374	58,53600	0,48959	-0,12575	0,69422	0,48194	0,89085	0,61845	0,79361	0,01581
26	2127,5	0,79370	0,456427	7,66270	3,49746	58,71702	0,50690	-0,05048	0,70604	0,49849	0,98343	0,69434	0,96714	0,00255
27	2155,5	0,82470	0,554607	7,67578	4,25704	58,91757	0,52605	0,02856	0,71912	0,51713	1,08161	0,77780	1,16989	0,00082
28	2198,0	0,85560	0,660194	7,69530	5,08039	59,21769	0,55464	0,10555	0,73864	0,54559	1,18720	0,87691	1,40944	0,01114
29	2567,0	0,88650	0,777466	7,85049	6,10350	61,63024	0,78190	-0,00443	0,89383	0,79893	1,30447	1,16598	1,70165	0,00002
30	3058,0	0,91730	0,913301	8,02552	7,32971	64,40891	1,03820	-0,12490	1,06885	1,14245	1,44031	1,53948	2,07448	0,01560
31	3061,5	0,94810	1,084661	8,02666	8,70620	64,42728	1,03987	0,04479	1,07000	1,14490	1,61167	1,72448	2,59747	0,00201
32	3306,5	0,97860	1,346608	8,10365	10,91244	65,66907	1,15261	0,19400	1,14698	1,31557	1,87361	2,14900	3,51043	0,03764
SUMA					-89,66800	1567,526704	-16,864172	0,000000	0,000000	18,882014	0,000000	27,650346	41,032570	0,542098
					<b>Y<sub>media</sub></b> -0,527005		<b>X<sub>media</sub></b> 6,956662							
					<b>AJUSTE</b>		0,00000							
<b>PENDIENTE</b>					1,46437									
<b>INTERCEPTO</b>					-10,71417									
					<b>Se</b>		0,13442							
					<b>r<sup>2</sup></b>		0,98679							
					<b>r</b>		0,99337							

## ANEXO G. Cálculos de la Linealización de la Distribución de la No Confiabilidad de la bomba P-1501C

j	t <sub>j</sub>	F(t <sub>j</sub> )	$\frac{Y_j}{\ln(-\ln(1-F(t_j)))}$	$X_j \ln(t_j)$	$X_j \cdot Y_j$	$X_j^2$	$\hat{Y}_j$	$ Y_j - \hat{Y}_j $	$X_j - X_{media}$	$[X_j - X_{media}]^2$	$Y_j - Y_{media}$	$(X_j - X_{media}) \cdot (Y_j - Y_{media})$	$[Y_j - Y_{media}]^2$	$[Y - \hat{Y}]^2$
1	43.0	0.04000	-3.198534	3,76120	-12.03033	14,14663	-2,73052	-0.46801	-2.14177	4.58719	-2.68159	5,74335	7,19092	0.21903
2	69.0	0.08000	-2.484328	4,23411	-10.51891	17,92766	-2.24176	-0.24256	-1.66887	2.78511	-1.96738	3,28330	3,87059	0.05884
3	138.0	0.12000	-2.057028	4,92725	-10.13550	24,27783	-1.52538	-0.53165	-0.97572	0.95203	-1.54008	1,50269	2,37185	0.28265
4	143.0	0.16000	-1.746671	4,96284	-8.66846	24,62983	-1.48859	-0.25808	-0.94013	0.88384	-1.22972	1,15610	1,51222	0.06660
5	165.0	0.20000	-1.499940	5,10595	-7.65861	26,07068	-1.34069	-0.15925	-0.79703	0.63525	-0.98299	0,78347	0,96628	0.02536
6	185.0	0.24000	-1.293034	5,22036	-6.75010	27,25211	-1.22245	-0.07059	-0.68262	0.46597	-0.77609	0,52977	0,60231	0.00498
7	190.0	0.28000	-1.113206	5,24702	-5.84102	27,53126	-1.19489	0.08168	-0.65595	0.43027	-0.59626	0,39112	0,35553	0.00667
8	194.0	0.32000	-0.952793	5,26786	-5.01918	27,75033	-1.17335	0.22056	-0.63511	0.40337	-0.43585	0,27681	0,18996	0.04865
9	212.5	0.36000	-0.806793	5,35894	-4.32356	28,71826	-1.07922	0.27242	-0.54403	0.29597	-0.28985	0,15769	0,08401	0.07421
10	216.5	0.40000	-0.671727	5,37759	-3.61227	28,91848	-1.05994	0.38821	-0.52538	0.27603	-0.15478	0,08132	0,02396	0.15071
11	228.0	0.44000	-0.545400	5,42935	-2.95921	29,47779	-1.00645	0.46141	-0.47363	0.22432	-0.02809	0,01331	0,00079	0.21290
12	331.0	0.48000	-0.424760	5,80212	-2.46451	33,66458	-0.62118	0.19642	-0.10085	0.01017	0.09219	-0.00930	0,00850	0.38585
13	360.5	0.52000	-0.309288	5,88749	-1.82093	34,66256	-0.53295	0.22366	-0.01548	0.00024	0.20766	-0.00321	0,04312	0.05002
14	382.1	0.56000	-0.197256	5,94568	-1.17282	35,35114	-0.47280	0.27555	0.04271	0.00182	0.31969	0.01365	0,10220	0.07593
15	458.5	0.60000	-0.087422	6,12796	-0.53572	37,55190	-0.28441	0.19699	0.22499	0.05062	0.42952	0.09664	0,18449	0.03881
16	689.0	0.64000	0.021420	6,53524	0.13999	42,70938	0.13652	-0.11510	0.63227	0.39976	0.53837	0.34039	0,28984	0.01325
17	691.5	0.68000	0.130532	6,53886	0.85353	42,75673	0.14026	-0.00973	0.63589	0.40436	0.64748	0.41173	0,41923	0.00009
18	740.0	0.72990	0.269235	6,60665	1.77874	43,64783	0.21032	0.05891	0.70368	0.49516	0.78618	0.55322	0,61808	0.00347
19	835.0	0.76700	0.376185	6,72743	2.53076	45,25834	0.33515	0.04103	0.82446	0.67973	0.89313	0.73635	0,79768	0.00168
20	914.0	0.80810	0.501248	6,81783	3.41743	46,48281	0.42858	0.07266	0.91486	0.83697	1.01819	0.93150	1,03672	0.00528
21	952.0	0.84910	0.637179	6,85857	4.37013	47,03991	0.47068	0.16649	0.95559	0.91316	1.15412	1,10287	1,33200	0.02772
22	1083.0	0.89010	0.792171	6,98749	5.53528	48,82502	0.60393	0.18824	1.08452	1.17618	1.30912	1.41976	1,71379	0.03543
23	2636.0	0.93110	0.983986	7,87702	7.75088	62,04741	1,52328	-0.53930	1.97405	3.89686	1.50093	2,96291	2,25280	0.29084
24	3186.0	0.97150	1.269157	8,06652	10,23768	65,06877	1,71914	-0.44998	2.16355	4.68095	1.78610	3,86432	3,19016	0.20248



## ANEXO H. Cálculos de la Linealización de la Distribución de la No Confiabilidad de la bomba P-1501D

j	t <sub>j</sub>	F(t <sub>j</sub> )	Y <sub>j</sub> ln(-ln(1-F(t <sub>j</sub> )))	X <sub>j</sub> ln(t <sub>j</sub> )	X <sub>j</sub> ·Y <sub>j</sub>	X <sub>j</sub> <sup>2</sup>	Ŷ <sub>j</sub>	Y <sub>j</sub> -Ŷ <sub>j</sub>	X <sub>j</sub> ·X <sub>media</sub>	[X <sub>j</sub> -X <sub>media</sub> ] <sup>2</sup>	Y <sub>j</sub> -Y <sub>media</sub>	(X <sub>j</sub> -X <sub>media</sub> )·(Y <sub>j</sub> -Y <sub>media</sub> )	(Y <sub>j</sub> -Y <sub>media</sub> ) <sup>2</sup>	(Y <sub>j</sub> -Ŷ <sub>j</sub> ) <sup>2</sup>
1	69.0	0,04167	-3,156849	4,23411	-13,36644	17,92766	-2,16477	-0,99208	-2,04878	4,19750	-2,64067	5,41016	6,97316	0,98423
2	109.5	0,08333	-2,441716	4,69592	-11,46612	22,05171	-1,79315	-0,64856	-1,58696	2,51845	-1,92554	3,05576	3,70771	0,42063
3	119.0	0,12500	-2,013419	4,77912	-9,62238	22,84002	-1,72621	-0,28721	-1,50376	2,26130	-1,49724	2,25150	2,24174	0,08249
4	190.0	0,16667	-1,701983	5,24702	-8,93035	27,53126	-1,34970	-0,35228	-1,03586	1,07301	-1,18581	1,22833	1,40614	0,12410
5	191.0	0,20833	-1,454081	5,25227	-7,63723	27,59838	-1,34548	-0,10860	-1,03061	1,06216	-0,93791	0,96662	0,87967	0,01179
6	193.5	0,25000	-1,245899	5,26528	-6,56001	27,72315	-1,33501	0,08911	-1,01761	1,03553	-0,72972	0,74257	0,53250	0,00794
7	214.5	0,29167	-1,064673	5,36831	-5,71550	28,81875	-1,25211	0,18743	-0,91458	0,83645	-0,54850	0,50164	0,30085	0,03513
8	264.0	0,33333	-0,902720	5,57595	-5,03352	31,09121	-1,08503	0,18231	-0,70694	0,49976	-0,38654	0,27326	0,14942	0,03324
9	281.0	0,37500	-0,755015	5,63835	-4,25704	31,79104	-1,03481	0,27980	-0,64453	0,41542	-0,23884	0,15394	0,05704	0,07829
10	305.0	0,41667	-0,618046	5,72031	-3,53542	32,72197	-0,96886	0,35082	-0,56257	0,31649	-0,10187	0,05731	0,01038	0,12307
11	329.5	0,45833	-0,489220	5,79758	-2,83629	33,61189	-0,90669	0,41747	-0,48531	0,23553	0,02696	-0,01308	0,00073	0,17428
12	386.5	0,50000	-0,366513	5,95713	-2,18337	35,48742	-0,77830	0,41179	-0,32575	0,10612	0,14966	-0,04875	0,02240	0,16957
13	455.0	0,54167	-0,248258	6,12030	-1,51941	37,45804	-0,64701	0,39875	-0,16259	0,02644	0,26792	-0,04356	0,07178	0,15900
14	457.0	0,58333	-0,132996	6,12468	-0,81456	37,51175	-0,64348	0,51048	-0,15820	0,02503	0,36318	-0,06062	0,14683	0,26059
15	740.0	0,62500	-0,019357	6,60665	-0,12788	43,64783	-0,25565	0,23630	0,32376	0,10482	0,49682	0,16085	0,24683	0,05584
16	861.0	0,66667	0,094048	6,75809	0,63558	45,67184	-0,13379	0,22784	0,47521	0,22582	0,61022	0,28998	0,37237	0,05191
17	1038.0	0,70833	0,208755	6,94505	1,44982	48,23373	0,01665	0,19211	0,66216	0,43846	0,72493	0,48002	0,52553	0,03691
18	1289.0	0,75700	0,346913	7,16162	2,48446	51,28883	0,19082	0,15600	0,87874	0,77218	0,86309	0,75843	0,74492	0,02434
19	1394.5	0,79990	0,475574	7,24029	3,44330	52,42182	0,25422	0,22136	0,95741	0,91662	0,99175	0,94951	0,98357	0,04900
20	3500.0	0,84270	0,614970	8,16052	5,01847	66,59406	0,99470	-0,37973	1,87763	3,52550	1,13115	2,12387	1,27949	0,14419
21	3999.0	0,88540	0,773024	8,29380	6,41131	68,78711	1,10194	-0,32892	2,01091	4,04377	1,28920	2,59247	1,66204	0,10819
22	4588.5	0,92810	0,967926	8,43131	8,16086	71,08696	1,21259	-0,24467	2,14842	4,61572	1,48410	3,18848	2,20256	0,05986
23	9253.0	0,97030	1,257497	9,13270	11,48435	83,40627	1,77698	-0,51949	2,84982	8,12146	1,77367	5,05464	3,14591	0,26987
											</			

## ANEXO I. Cálculos de la Linealización de la Distribución de la No Confiabilidad de la bomba P-1501E

j	t <sub>j</sub>	F(t <sub>j</sub> )	Y <sub>j</sub> ln(-ln(1-F(t <sub>j</sub> )))	X <sub>j</sub> ln(t <sub>j</sub> )	X <sub>j</sub> *Y <sub>j</sub>	X <sub>j</sub> <sup>2</sup>	Ŷ <sub>j</sub>	Y <sub>j</sub> -Ŷ <sub>j</sub>	X <sub>j</sub> -X <sub>media</sub>	(X <sub>j</sub> -X <sub>media</sub> ) <sup>2</sup>	Y <sub>j</sub> -Y <sub>media</sub>	(X <sub>j</sub> -X <sub>media</sub> )*(Y <sub>j</sub> -Y <sub>media</sub> )	(Y <sub>j</sub> -Y <sub>media</sub> ) <sup>2</sup>	(Y <sub>j</sub> -Ŷ <sub>j</sub> ) <sup>2</sup>
1	39,0	0,03125	-3,449904	3,66356	-12,63893	13,42168	-3,20405	-0,24585	-2,90652	8,44787	-2,92577	8,50382	8,56013	0,06044
2	60,0	0,06250	-2,740493	4,09434	-11,22052	16,76366	-2,80685	0,06636	-2,47574	6,12928	-2,21636	5,48713	4,91225	0,00440
3	110,0	0,09375	-2,318307	4,70048	-10,89716	22,09452	-2,24798	-0,07033	-1,86960	3,49542	-1,79417	3,54399	3,21906	0,00495
4	112,0	0,12500	-2,013419	4,71850	-9,50031	22,26423	-2,23136	0,21794	-1,85158	3,42837	-1,48929	2,75754	2,21797	0,04750
5	141,0	0,15625	-1,772551	4,94876	-8,77193	24,49022	-2,01905	0,24650	-1,62132	2,62869	-1,24842	2,02409	1,58555	0,06076
6	256,0	0,18750	-1,571953	5,54518	-8,71676	30,74899	-1,46913	-0,10282	-1,02491	1,05043	-1,04782	1,07392	1,09793	0,01057
7	335,0	0,21875	-1,398934	5,81413	-8,13358	33,80411	-1,22115	-0,17778	-0,75595	0,57147	-0,87480	0,66131	0,76528	0,03161
8	379,0	0,25000	-1,245899	5,93754	-7,39757	35,25434	-1,10737	-0,13853	-0,63255	0,40012	-0,72177	0,45655	0,52095	0,01919
9	400,8	0,28125	-1,107931	5,99354	-6,64042	35,92249	-1,05573	-0,05220	-0,57655	0,33241	-0,58380	0,33659	0,34082	0,00272
10	432,5	0,31250	-0,981647	6,06958	-5,95819	36,83983	-0,98561	0,00397	-0,50050	0,25050	-0,45751	0,22899	0,20932	0,00002
11	435,3	0,34375	-0,864616	6,07610	-5,25349	36,91904	-0,97960	0,11498	-0,49398	0,24402	-0,34048	0,16819	0,11593	0,01322
12	566,0	0,37500	-0,755015	6,33859	-4,78573	40,17777	-0,73758	-0,01744	-0,23149	0,05359	-0,23088	0,05345	0,05331	0,00030
13	679,0	0,40625	-0,651435	6,52062	-4,24776	42,51850	-0,56974	-0,08170	-0,04946	0,00245	-0,12730	0,00630	0,01621	0,00667
14	748,3	0,43750	-0,552752	6,61774	-3,65797	43,79444	-0,48019	-0,07256	0,04765	0,00227	-0,02862	-0,00136	0,00082	0,00526
15	838,0	0,46875	-0,458039	6,73102	-3,08307	45,30660	-0,37575	-0,08229	0,16093	0,02590	0,06609	0,01064	0,00437	0,00677
16	841,6	0,50000	-0,366513	6,73528	-2,46857	45,36401	-0,37182	0,00530	0,16520	0,02729	0,15762	0,02604	0,02484	0,00003
17	952,6	0,53125	-0,277487	6,85917	-1,90333	47,04827	-0,25758	-0,01991	0,28909	0,08357	0,24665	0,07130	0,06083	0,00040
18	1021,7	0,56380	-0,186746	6,92919	-1,29400	48,01373	-0,19302	0,00627	0,35911	0,12896	0,33739	0,12116	0,11383	0,00004
19	1105,1	0,59570	-0,099160	7,00767	-0,69488	49,10748	-0,12066	0,02150	0,43759	0,19148	0,42497	0,18596	0,18060	0,00046
20	1149,0	0,62760	-0,012288	7,04665	-0,08659	49,65524	-0,08472	0,07244	0,47656	0,22711	0,51184	0,24393	0,26198	0,00525
21	1315,3	0,67950	0,129161	7,18178	0,92760	51,57799	0,03988	0,08929	0,61170	0,37417	0,65329	0,39962	0,42679	0,00797
22	1389,0	0,69150	0,162147	7,23634	1,17335	52,36461	0,09018	0,07197	0,66626	0,44390	0,68628	0,45724	0,47098	0,00518
23	1421,0	0,72340	0,250901	7,25912	1,82132	52,69477	0,11118	0,13972	0,68903	0,47477	0,77503	0,53402	0,60068	0,01952
24	1879,5	0,75530	0,341973	7,53876	2,57805	56,83292	0,36902	-0,02705	0,96868	0,93834	0,86611	0,83898	0,75014	0,00073
25	2033,0	0,78720	0,436578	7,61727	3,32553	58,02277	0,44141	-0,00483	1,04718	1,09659	0,96071	1,00604	0,92297	0,00002
26	2105,0	0,81910	0,536383	7,65207	4,10444	58,55419	0,47350	0,06288	1,08199	1,17070	1,06052	1,14746	1,12469	0,00395
27	2211,5	0,85100	0,643857	7,70143	4,95861	59,31197	0,51901	0,12485	1,13134	1,27994	1,16799	1,36420	1,36240	0,01559
28	2232,0	0,88280	0,762614	7,71065	5,80025	59,45417	0,52751	0,23510	1,14057	1,30090	1,28675	1,46762	1,65572	0,05527
29	3135,0	0,91470	0,900804	8,05038	7,25182	64,80869	0,84076	0,06005	1,48030	2,19129	1,42494	2,10933	2,03044	0,00361
30	5156,0	0,94650	1,074345	8,54792	9,18341	73,06687	1,29950	-0,22516	1,97783	3,91182	1,59848	3,16152	2,55513	0,05070
31	6831,0	0,97790	1,338201	8,82923	11,81528	77,95524	1,55888	-0,22068	2,25914	5,10373	1,86233	4,20728	3,46829	0,04870
SUMA					-64,33109	1384,153356	-16,248125	0,000000	0,000000	46,007328	0,000000	42,420434	39,605006	0,491819
				Y <sub>media</sub>	X <sub>media</sub>									
				-0,524133	6,570084									
					AJUSTE	0,00000								
PENDIENTE					0,92204									
INTERCEPTO					-6,58199									
					Se	0,13023								
					r <sup>2</sup>	0,98758	CUMPLE	La alineación cumple bien con las pruebas de ajuste (0), coeficiente de determinación (mayor a 0.9025) y coeficiente de correlación (mayor a 0.95)						
					r	0,99377	CUMPLE							
Parámetro de forma beta β = pendiente = b					0,92204									
Parámetro de escala η					1259,57944									
MTBF					1308,3837									

## ANEXO J. Cálculos de la Linealización de la Distribución de Mantenibilidad de la bomba P-1501A

j	t <sub>j</sub>	M(t <sub>j</sub> )	Y <sub>j</sub> ln(-(ln(1-F(t <sub>j</sub> ))))	X <sub>j</sub> ln(t <sub>j</sub> )	X <sub>j</sub> *Y <sub>j</sub>	X <sub>j</sub> <sup>2</sup>	Ŷ <sub>j</sub>	[Y <sub>j</sub> -Ŷ <sub>j</sub> ]	X <sub>j</sub> -X <sub>media</sub>	[X <sub>j</sub> -X <sub>media</sub> ] <sup>2</sup>	Y <sub>j</sub> -Y <sub>media</sub>	(X <sub>j</sub> -X <sub>media</sub> )*(Y <sub>j</sub> -Y <sub>media</sub> )	[Y <sub>j</sub> -Y <sub>media</sub> ] <sup>2</sup>	[Y-Ŷ] <sup>2</sup>	
1	0.5	0.03125	-3.449904	-0.69315	2.39129	0.48045	-2.54859	-0.90131	-3.02763	9.16654	-2.92583	8.85833	8.56048	0.81237	
2	1.0	0.06250	-2.740493	0.00000	0.00000	0.00000	-2.08510	-0.65540	-2.33448	5.44881	-2.21642	5.17419	4.91251	0.42955	
3	1.4	0.09375	-2.318307	0.34359	-0.79655	0.11805	-1.85534	-0.46236	-1.98089	3.96365	-1.79423	3.57213	3.21927	0.21434	
4	1.5	0.12500	-2.013419	0.40547	-0.81637	0.16440	-1.81397	-0.19945	-1.92902	3.72111	-1.48934	2.87297	2.21815	0.03878	
5	1.9	0.15625	-1.772551	0.64710	-1.14702	0.41874	-1.65239	-0.12016	-1.68738	2.84725	-1.24848	2.10665	1.55869	0.01444	
6	2.0	0.18750	-1.671953	0.69315	-1.08959	0.48045	-1.62160	0.04965	-1.64134	2.69398	-1.04788	1.71992	1.09805	0.00247	
7	2.3	0.21875	-1.398934	0.85015	-1.18930	0.72276	-1.51662	0.11768	-1.48433	2.20324	-0.87486	1.29858	0.76538	0.01385	
8	3.0	0.25000	-1.245899	1.09861	-1.36876	1.20695	-1.35048	0.10458	-1.23587	1.52738	-0.72183	0.89208	0.52103	0.01094	
9	3.6	0.28125	-1.107931	1.27536	-1.41301	1.62655	-1.23229	0.12436	-1.05912	1.12173	-0.58396	0.61837	0.34089	0.01546	
10	4.0	0.31250	-0.981647	1.39829	-1.36985	1.92181	-1.15911	0.17646	-0.94819	0.89806	-0.45757	0.43387	0.20397	0.03114	
11	4.5	0.34375	-0.864616	1.50408	-1.30045	2.26225	-1.07935	0.21473	-0.83041	0.68957	-0.34054	0.28279	0.11597	0.04611	
12	5.0	0.37500	-0.755015	1.60944	-1.21515	2.59029	-1.00890	0.25388	-0.72504	0.52569	-0.23094	0.16744	0.05333	0.06446	
13	5.0	0.40625	-0.651435	1.60944	-1.04844	2.59029	-1.00890	0.35746	-0.72504	0.52569	-0.12736	0.09234	0.01622	0.12778	
14	6.0	0.43750	-0.552752	1.79176	-0.99040	3.21040	-0.88698	0.33423	-0.54272	0.29455	-0.02868	0.01556	0.00082	0.11171	
15	6.0	0.46875	-0.458039	1.79176	-0.82070	3.21040	-0.88698	0.42894	-0.54272	0.29455	0.06603	-0.03584	0.00436	0.18399	
16	6.0	0.50000	-0.366513	1.79176	-0.65670	3.21040	-0.88698	0.52047	-0.54272	0.29455	0.15756	-0.08551	0.02483	0.27089	
17	8.5	0.53190	-0.275657	2.14007	-0.58992	4.57988	-0.65408	0.37842	-0.19442	0.03780	0.24842	-0.04830	0.06171	0.14320	
18	10.0	0.56380	-0.186746	2.30259	-0.43000	5.30190	-0.54540	0.35866	-0.03190	0.00102	0.33733	-0.01076	0.11379	0.12864	
19	14.0	0.59570	-0.099160	2.63906	-0.26169	6.96462	-0.32041	0.22125	0.30457	0.09277	0.42491	0.12942	0.18055	0.04895	
20	18.0	0.62760	-0.012288	2.89037	-0.03552	8.35425	-0.15236	0.14007	0.55589	0.30901	0.51179	0.28450	0.26192	0.00943	
21	18.5	0.67950	0.129161	2.91777	0.37686	8.51339	-0.13404	0.26320	0.58329	0.34022	0.65323	0.38102	0.42672	0.06928	
22	32.0	0.69150	0.162147	3.46574	0.56196	12.01133	0.23237	-0.07022	1.13125	1.27973	0.68622	0.77629	0.47090	0.00493	
23	36.0	0.72340	0.250901	3.58352	0.89911	12.84161	0.31113	-0.06023	1.24904	1.56009	0.77498	0.96797	0.60059	0.00363	
24	39.5	0.75530	0.341973	3.67630	1.25720	13.51519	0.37317	-0.03120	1.34182	1.80048	0.86605	1.16208	0.75004	0.00097	
25	55.3	0.78720	0.436578	4.01187	1.75149	16.09509	0.59756	-0.16098	1.67739	2.81362	0.96065	1.61138	0.92285	0.02592	
26	61.0	0.81910	0.536383	4.11087	2.20500	16.89928	0.66376	-0.12738	1.77639	3.15557	1.06046	1.88379	1.12457	0.01623	
27	74.0	0.85100	0.643857	4.30407	2.77120	18.52498	0.79295	-0.14909	1.96958	3.87925	1.16793	2.30034	1.36406	0.02223	
28	107.0	0.88290	0.762614	4.67283	3.56357	21.83533	1.03953	-0.27692	2.33835	5.46786	1.28669	3.00872	1.65557	0.07668	
29	170.0	0.91470	0.900804	5.13580	4.62635	26.37643	1.34911	-0.44831	2.80132	7.84737	1.42488	3.99153	2.03028	0.20098	
30	180.0	0.94650	1.074345	5.19296	5.57903	26.96680	1.38733	-0.31298	2.85847	8.17087	1.59842	4.56904	2.55494	0.09796	
31	185.0	0.97790	1.338201	5.22036	6.98588	27.25211	1.40565	-0.06745	2.88587	8.32826	1.86227	5.37429	3.46807	0.00455	
		SUMA			16.438496	250.246386	-16.246295	0.000000	0.000000	81.302292	0.000000		54.365192	39.605912	3.253012
		Y <sub>media</sub>	X <sub>media</sub>												
		-0.524074	2.334483												
		PENDIENTE	0.66868	AJUSTE		0.00000									
		INTERCEPTO	-2.08510	Se		0.33492									
				r <sup>2</sup>		0.91787	CUMPLE								
				r		0.95805	CUMPLE								
		Parámetro de forma beta β = pendiente = b	0.66868												
		Parámetro de escala η	22.60625												
		MTRR (Tiempo medio de reparaciones)	29.9563												

La alineación cumple bien con las pruebas de ajuste (0), coeficiente de determinación (mayor a 0.9025) y coeficiente de correlación (mayor a 0.95)

## ANEXO K. Cálculos de la Linealización de la Distribución de Mantenibilidad de la bomba P-1501B

J	t <sub>j</sub>	M(t <sub>j</sub> )	$\frac{Y_j}{\ln(-\ln(1-F(t_j)))}$	$X_j \ln(t_j)$	$X_j \cdot Y_j$	$X_j^2$	$\hat{Y}_j$	$ Y_j - \hat{Y}_j $	$X_j \cdot X_{media}$	$[X_j \cdot X_{media}]^2$	$Y_j \cdot Y_{media}$	$(X_j \cdot X_{media}) \cdot (Y_j \cdot Y_{media})$	$[Y_j \cdot Y_{media}]^2$	$[Y - \hat{Y}]^2$
1	0,3	0,03125	-3,449904	-1,38629	4,78258	1,92181	-2,67472	-0,77519	-3,06491	9,39366	-2,92816	8,97455	8,57413	0,60092
2	0,3	0,06250	-2,740493	-1,10866	3,03828	1,22913	-2,47828	-0,26080	-2,78728	7,76891	-2,21875	6,18427	4,92286	0,06802
3	1,0	0,09375	-2,318307	0,00000	0,00000	0,00000	-1,70090	-0,61741	-1,67861	2,81774	-1,79657	3,01574	3,22765	0,38119
4	1,4	0,12500	-2,013419	0,35066	-0,70602	0,12296	-1,45458	-0,55884	-1,32796	1,76347	-1,49168	1,98088	2,22510	0,31230
5	1,4	0,15625	-1,772551	0,35066	-0,62156	0,12296	-1,45458	-0,31797	-1,32796	1,76347	-1,25081	1,66102	1,56452	0,10111
6	1,5	0,18750	-1,571953	0,40547	-0,63737	0,16440	-1,41608	-0,15588	-1,27315	1,62091	-1,05021	1,33707	1,10294	0,02430
7	1,5	0,21875	-1,398934	0,40547	-0,56722	0,16440	-1,41608	0,01714	-1,27315	1,62091	-0,87719	1,11680	0,76947	0,00029
8	2,0	0,25000	-1,245899	0,69315	-0,86359	0,48045	-1,21399	-0,03191	-0,98547	0,97114	-0,72416	0,71363	0,52440	0,00102
9	2,0	0,28125	-1,107931	0,69315	-0,76796	0,48045	-1,21399	0,10606	-0,98547	0,97114	-0,58619	0,57767	0,34362	0,01125
10	2,0	0,34050	-0,876413	0,69315	-0,60748	0,48045	-1,21399	0,33758	-0,98547	0,97114	-0,35467	0,34952	0,12579	0,11396
11	2,5	0,34050	-0,876413	0,91629	-0,80305	0,83959	-1,05724	0,18083	-0,76232	0,58114	-0,35467	0,27037	0,12579	0,03270
12	2,7	0,37240	-0,763887	0,98208	-0,75020	0,96448	-1,01103	0,24714	-0,69654	0,48516	-0,24214	0,16866	0,05863	0,06108
13	3,0	0,40430	-0,657745	1,09861	-0,72261	1,20695	-0,92917	0,27142	-0,58000	0,33640	-0,13600	0,07888	0,01850	0,07367
14	3,0	0,43620	-0,556772	1,09861	-0,61168	1,20695	-0,92917	0,37240	-0,58000	0,33640	-0,03503	0,02032	0,00123	0,13868
15	4,0	0,46810	-0,459974	1,38629	-0,63766	1,92181	-0,72708	0,26711	-0,29232	0,08545	0,06177	-0,01806	0,00382	0,07135
16	4,0	0,50000	-0,366513	1,38629	-0,50809	1,92181	-0,72708	0,36057	-0,29232	0,08545	0,15523	-0,04538	0,02410	0,13001
17	4,5	0,53190	-0,275657	1,50408	-0,41461	2,26225	-0,64435	0,36869	-0,17454	0,03046	0,24608	-0,04295	0,00656	0,13593
18	5,0	0,56380	-0,186746	1,60944	-0,30056	2,59029	-0,57034	0,38359	-0,06918	0,00479	0,33500	-0,02317	0,11222	0,14714
19	5,0	0,59570	-0,099160	1,60944	-0,15959	2,59029	-0,57034	0,47118	-0,06918	0,00479	0,42258	-0,02923	0,17858	0,22201
20	6,0	0,62760	-0,012288	1,79176	-0,02202	3,21040	-0,44226	0,42997	0,11315	0,01280	0,50945	0,05764	0,25954	0,18488
21	9,3	0,67950	0,129161	2,22462	0,28733	4,94895	-0,13819	0,26735	0,54601	0,29813	0,65090	0,35540	0,42367	0,07148
22	10,0	0,69150	0,162147	2,30259	0,37336	5,30190	-0,08343	0,24557	0,62397	0,38934	0,68389	0,42673	0,46770	0,06031
23	12,0	0,72340	0,250901	2,48491	0,62347	6,17476	0,04465	0,20625	0,80629	0,65011	0,77264	0,62298	0,59698	0,04254
24	25,0	0,75530	0,341973	3,21888	1,10077	10,36116	0,56023	-0,21826	1,54026	2,37241	0,86371	1,33035	0,74600	0,04764
25	25,3	0,78720	0,436578	3,22883	1,40963	10,42532	0,56722	-0,13064	1,55021	2,40316	0,95832	1,48560	0,91838	0,01707
26	29,6	0,81910	0,536383	3,38710	1,81678	11,47244	0,67840	-0,14202	1,70848	2,91892	1,05812	1,80779	1,11963	0,02017
27	31,0	0,85100	0,643857	3,43399	2,21100	11,79227	0,71134	-0,06748	1,75537	3,08134	1,16560	2,04606	1,35862	0,00455
28	34,0	0,88280	0,762614	3,52636	2,68925	12,43522	0,77623	-0,01361	1,84775	3,41417	1,28436	2,37316	1,64957	0,00019
29	62,5	0,91470	0,900804	4,13517	3,72497	17,09960	1,20389	-0,30308	2,45655	6,03465	1,42255	3,49456	2,02364	0,09186
30	109,0	0,94650	1,074345	4,69135	5,04012	22,00874	1,59458	-0,52024	3,01273	9,07657	1,59609	4,80858	2,54749	0,27065
31	137,5	0,97790	1,338201	4,92362	6,58880	24,24207	1,75775	-0,41955	3,24501	10,53009	1,85994	6,03553	3,45939	0,17602
SUMA					23,985088	160,144280	-16,173996	0,000000	0,000000	72,794215	0,000000	51,134980	39,534506	3,614260
			Y <sub>media</sub>	X <sub>media</sub>										
			-0,521742	1,678614										
					AJUSTE	0,00000								
PENDIENTE					0,70246									
INTERCEPTO					-1,70090									
					Se	0,35303								
					r <sup>2</sup>	0,90858	CUMPLE	La alineacion cumple bien con las pruebas de ajuste (0), coeficiente de determinacion (mayor a 0.9025) y coeficiente de correlacion (mayor a 0.95)						
					r	0,95319	CUMPLE							
Parámetro de forma beta β = pendiente = b						0,70246								
Parámetro de escala η						11,26104								
MTTR (Tiempo medio de reparaciones)						14,2071								

## ANEXO L. Cálculos de la Linealización de la Distribución de Mantenibilidad de la bomba P-1501C

j	t <sub>j</sub>	M(t <sub>j</sub> )	$\frac{Y_j}{\ln(-\ln(1-F(t_j)))}$	$X_j \ln(t_j)$	$X_j \cdot Y_j$	$X_j^2$	$\hat{Y}_j$	$ Y_j - \hat{Y}_j $	$X_j \cdot X_{media}$	$[X_j - X_{media}]^2$	$Y_j \cdot Y_{media}$	$(X_j - X_{media}) \cdot (Y_j - Y_{media})$	$[Y_j - Y_{media}]^2$	$[Y - \hat{Y}]^2$
1	1.0	0.04000	-3.198534	0.00000	0.00000	0.00000	-2.12642	-1.07212	-1.01352	1.02723	-2.68806	2.72442	7.22569	1.14944
2	1.0	0.08000	-2.484328	0.00000	0.00000	0.00000	-2.12642	-0.35791	-1.01352	1.02723	-1.97386	2.00055	3.89611	0.12810
3	1.0	0.12000	-2.057028	0.00000	0.00000	0.00000	-2.12642	0.06939	-1.01352	1.02723	-1.54656	1.56747	2.39184	0.00481
4	1.5	0.16000	-1.746671	0.40547	-0.70821	0.16440	-1.47995	-0.26672	-0.60806	0.36974	-1.23620	0.75168	1.52819	0.07114
5	2.0	0.20000	-1.499940	0.69315	-1.03968	0.48045	-1.02127	-0.47867	-0.32038	0.10264	-0.98947	0.31700	0.97905	0.22912
6	2.0	0.24000	-1.293034	0.69315	-0.89626	0.48045	-1.02127	-0.27176	-0.32038	0.10264	-0.78256	0.25072	0.61241	0.07385
7	2.0	0.28000	-1.113206	0.69315	-0.77162	0.48045	-1.02127	-0.09193	-0.32038	0.10264	-0.60274	0.19310	0.36329	0.00845
8	2.0	0.32000	-0.952793	0.69315	-0.66043	0.48045	-1.02127	0.06948	-0.32038	0.10264	-0.44232	0.13655	0.25665	0.00469
9	2.0	0.36000	-0.806793	0.69315	-0.55923	0.48045	-1.02127	0.21448	-0.32038	0.10264	-0.29632	0.09494	0.08781	0.04600
10	2.0	0.43890	-0.548430	0.69315	-0.38014	0.48045	-1.02127	0.47284	-0.32038	0.10264	-0.03796	0.01216	0.00144	0.22358
11	2.0	0.43890	-0.548430	0.69315	-0.38014	0.48045	-1.02127	0.47284	-0.32038	0.10264	-0.03796	0.01216	0.00144	0.22358
12	2.0	0.47950	-0.426231	0.69315	-0.29544	0.48045	-1.02127	0.59504	-0.32038	0.10264	0.08424	-0.02699	0.00710	0.35408
13	2.0	0.52050	-0.307869	0.69315	-0.21340	0.48045	-1.02127	0.71341	-0.32038	0.10264	0.20280	-0.06491	0.04105	0.50895
14	3.0	0.56160	-0.192828	1.09861	-0.21184	1.20695	-0.37481	0.18198	0.08509	0.00724	0.31764	0.02703	0.10090	0.03312
15	3.0	0.60270	-0.080057	1.09861	-0.08795	1.20695	-0.37481	0.29475	0.08509	0.00724	0.43041	0.03662	0.18526	0.08688
16	3.6	0.64380	0.031753	1.27815	0.04059	1.63367	-0.08855	1.12031	0.26463	0.07003	0.54222	0.14349	0.29401	0.01447
17	4.0	0.68490	0.143984	1.38629	0.19960	1.92181	0.08387	0.06012	0.37277	0.13896	0.65445	0.24396	0.42831	0.00361
18	4.0	0.72990	0.269235	1.38629	0.37324	1.92181	0.08387	0.18537	0.37277	0.13896	0.77970	0.29065	0.60794	0.03436
19	5.0	0.76700	0.376185	1.60944	0.60545	2.59029	0.43964	-0.06346	0.59591	0.35511	0.88665	0.52837	0.78616	0.00403
20	5.0	0.80810	0.501248	1.60944	0.80673	2.59029	0.43964	0.06161	0.59591	0.35511	1.01172	0.60290	1.02357	0.00380
21	6.0	0.84910	0.637179	1.79176	1.14167	3.21040	0.73033	-0.09315	0.77823	0.60565	1.14785	0.89314	1.31710	0.00868
22	6.4	0.89010	0.792171	1.85786	1.47174	3.45164	0.83572	-0.04355	0.84433	0.71290	1.30264	1.09986	1.69687	0.00190
23	8.0	0.93110	0.983986	2.07944	2.04614	4.32408	1.18901	-0.20502	1.06592	1.13618	1.49446	1.59297	2.23340	0.04203
24	12.0	0.97150	1.269157	2.48491	3.15374	6.17476	1.83547	-0.56632	1.47138	2.16496	1.77963	2.61851	3.16707	0.32072
		SUMA			3.634550	34.721136	-12.251274	0.000000	0.000000	10.067550	0.000000	16.051522	29.171647	3.579388
			<div><div>Y<sub>media</sub></div><div>-0.510470</div></div>	<div><div>X<sub>media</sub></div><div>1.013525</div></div>										
		PENDIENTE	1.59438	AJUSTE		0.00000	<div>La alineacion cumple bien con las pruebas de ajuste (0), coeficiente de determinacion (mayor a 0.9025) y coeficiente de correlacion (mayor a 0.95)</div>							
		INTERCEPTO	-2.12642	Se		0.40336								
				r <sup>2</sup>		0.87730								
				r		0.93664								

## ANEXO Ñ. Cálculos de la Linealización de la Distribución de Mantenibilidad de la bomba P-1501D

j	t <sub>j</sub>	M(t <sub>j</sub> )	Y <sub>j</sub> ln(-ln(1-F(t <sub>j</sub> )))	X <sub>j</sub> ln(t <sub>j</sub> )	X <sub>j</sub> ·Y <sub>j</sub>	X <sub>j</sub> <sup>2</sup>	Ŷ <sub>j</sub>	Y <sub>j</sub> -Ŷ <sub>j</sub>	X <sub>j</sub> -X <sub>media</sub>	[X <sub>j</sub> -X <sub>media</sub> ] <sup>2</sup>	Y <sub>j</sub> -Y <sub>media</sub>	(X <sub>j</sub> -X <sub>media</sub> )*(Y <sub>j</sub> -Y <sub>media</sub> )	[Y <sub>j</sub> -Y <sub>media</sub> ] <sup>2</sup>	[Y-Ŷ] <sup>2</sup>
1	1,0	0,04167	-3,156849	0,00000	0,00000	0,00000	-1,46852	-1,68832	-1,02982	1,06053	-2,58709	2,66424	6,69304	2,85044
2	1,0	0,08333	-2,441716	0,00000	0,00000	0,00000	-1,46852	-0,97319	-1,02982	1,06053	-1,87196	1,92778	3,50422	0,94710
3	1,0	0,12500	-2,013419	0,00000	0,00000	0,00000	-1,46852	-0,54489	-1,02982	1,06053	-1,44366	1,48671	2,08415	0,29691
4	1,0	0,16667	-1,701983	0,00000	0,00000	0,00000	-1,46852	-0,23346	-1,02982	1,06053	-1,13222	1,16599	1,28193	0,05450
5	1,0	0,20833	-1,454081	0,00000	0,00000	0,00000	-1,46852	0,01444	-1,02982	1,06053	-0,88432	0,91069	0,78203	0,00021
6	1,5	0,25000	-1,245899	0,40547	-0,50517	0,16440	-1,11466	-0,13124	-0,62436	0,38982	-0,67614	0,42215	0,45717	0,01722
7	2,0	0,29167	-1,064673	0,69315	-0,73798	0,48045	-0,86359	-0,20108	-0,33668	0,11335	-0,49491	0,16663	0,24494	0,04044
8	2,0	0,33333	-0,902720	0,69315	-0,62572	0,48045	-0,86359	-0,03913	-0,33668	0,11335	-0,33296	0,11210	0,11086	0,00153
9	2,0	0,37500	-0,755015	0,69315	-0,52334	0,48045	-0,86359	0,10857	-0,33668	0,11335	-0,18526	0,06237	0,03432	0,01179
10	2,0	0,43890	-0,548430	0,69315	-0,38014	0,48045	-0,86359	0,31516	-0,33668	0,11335	0,02133	-0,00718	0,00045	0,09932
11	2,0	0,43890	-0,548430	0,69315	-0,38014	0,48045	-0,86359	0,31516	-0,33668	0,11335	0,02133	-0,00718	0,00045	0,09932
12	2,0	0,47950	-0,426231	0,69315	-0,29544	0,48045	-0,86359	0,43736	-0,33668	0,11335	0,14353	-0,04832	0,02060	0,19128
13	2,0	0,52050	-0,307869	0,69315	-0,21340	0,48045	-0,86359	0,55572	-0,33668	0,11335	0,26189	-0,08817	0,06859	0,30882
14	2,0	0,56160	-0,192828	0,69315	-0,13366	0,48045	-0,86359	0,67076	-0,33668	0,11335	0,37693	-0,12690	0,14208	0,44992
15	2,0	0,60270	-0,080057	0,69315	-0,05549	0,48045	-0,86359	0,78353	-0,33668	0,11335	0,48970	-0,16487	0,23981	0,61392
16	3,0	0,64380	0,031753	1,09861	0,03488	1,20695	-0,50972	0,54148	0,06879	0,00473	0,60151	0,04138	0,36182	0,29320
17	4,0	0,68490	0,143984	1,38629	0,19960	1,92181	-0,25865	0,40264	0,35647	0,12707	0,71374	0,25443	0,50943	0,16212
18	4,5	0,72990	0,269235	1,50408	0,40495	2,26225	-0,15586	0,42509	0,47425	0,22492	0,83899	0,39790	0,70391	0,18070
19	5,0	0,76700	0,376185	1,60944	0,60545	2,59029	-0,06391	0,44009	0,57962	0,33595	0,94594	0,54828	0,89481	0,19368
20	6,0	0,80810	0,501248	1,79176	0,89812	3,21040	0,09521	0,40604	0,76194	0,58055	1,07101	0,81604	1,14706	0,16487
21	18,0	0,84910	0,637179	2,89037	1,84168	8,35425	1,05401	-0,41683	1,86055	3,46164	1,20694	2,24557	1,45670	0,17375
22	27,0	0,89010	0,792171	3,29584	2,61087	10,86254	1,40788	-0,61571	2,26015	5,13482	1,36193	3,08615	1,85485	0,37910
23	32,0	0,93110	0,983986	3,46574	3,41024	12,01133	1,55616	-0,57217	2,43591	5,93367	1,55375	3,78479	2,41413	0,32738

## ANEXO M. Cálculos de la Linealización de la Distribución de Mantenibilidad de la bomba P-1501E

j	t <sub>j</sub>	M(t <sub>j</sub> )	$Y_j$ ln(-ln(1-F(t <sub>j</sub> )))	$X_j$ ln(t <sub>j</sub> )	$X_j \cdot Y_j$	$X_j^2$	$\hat{Y}_j$	$ Y_j - \hat{Y}_j $	$X_j \cdot X_{media}$	$[X_j \cdot X_{media}]^2$	$Y_j \cdot Y_{media}$	$(X_j \cdot X_{media}) \cdot (Y_j - Y_{media})$	$[Y_j - Y_{media}]^2$	$[Y - \hat{Y}]^2$
1	1.0	0.03125	-3.449904	0.00000	0.00000	0.00000	-2.34099	-1.10891	-3.17304	10.06816	-2.92816	9.29117	8.57413	1.22969
2	1.0	0.06250	-2.740493	0.00000	0.00000	0.00000	-2.34099	-0.39950	-3.17304	10.06816	-2.21875	4.92286	0.15960	0.15960
3	2.0	0.09375	-2.318307	0.69315	-1.60693	0.48045	-1.94358	-0.37473	-2.47989	6.14985	-1.79657	4.45528	3.22765	0.14042
4	2.0	0.12500	-2.013419	0.69315	-1.39560	0.48045	-1.94358	-0.06984	-2.47989	6.14985	-1.49168	3.69919	2.22510	0.00488
5	2.0	0.15625	-1.772551	0.69315	-1.22864	0.48045	-1.94358	0.17103	-2.47989	6.14985	-1.25081	3.10187	1.56452	0.02925
6	3.0	0.18750	-1.571953	1.09861	-1.72697	1.20695	-1.71110	0.13915	-2.07442	4.30324	-1.05021	2.17858	1.10294	0.01936
7	5.0	0.21875	-1.398934	1.60944	-2.25150	2.59029	-1.41822	0.01929	-1.56360	2.44484	-0.87719	1.37158	0.76947	0.00037
8	6.0	0.25000	-1.245899	1.79176	-2.23235	3.21040	-1.31369	0.06779	-1.38128	1.90793	-0.72416	1.00026	0.52440	0.00460
9	6.4	0.28125	-1.107931	1.85942	-2.06011	3.45744	-1.27490	0.16697	-1.31362	1.72559	-0.58619	0.77003	0.34362	0.02788
10	8.5	0.34050	-0.876413	2.14007	-1.87558	4.57988	-1.11399	0.23758	-1.03297	1.06703	-0.35467	0.36637	0.12579	0.05644
11	9.0	0.34050	-0.876413	2.19722	-1.92568	4.82780	-1.08122	0.20481	-0.97581	0.95221	-0.35467	0.34609	0.12579	0.04195
12	9.7	0.37240	-0.763887	2.26903	-1.73328	5.14849	-1.04005	0.27616	-0.90401	0.81723	-0.24214	0.21890	0.05863	0.07627
13	10.0	0.40430	-0.657745	2.30259	-1.51451	5.30190	-1.02081	0.36307	-0.87045	0.75769	-0.13600	0.11838	0.01850	0.13182
14	13.0	0.43620	-0.556772	2.56495	-1.42809	6.57897	-0.87039	0.31361	-0.60809	0.36977	-0.03503	0.02130	0.00123	0.09835
15	14.0	0.46810	-0.459974	2.63906	-1.21390	6.96462	-0.82790	0.36792	-0.53398	0.28513	0.06177	-0.03298	0.00382	0.13537
16	20.0	0.50000	-0.366513	2.99573	-1.09797	8.97441	-0.62340	0.25689	-0.17730	0.03144	0.15523	-0.02752	0.02410	0.06599
17	27.5	0.53190	-0.275657	3.31419	-0.91358	10.98383	-0.44081	0.16516	0.14115	0.01992	0.24608	0.03473	0.00656	0.02728
18	28.0	0.56380	-0.186746	3.33220	-0.62228	11.10359	-0.43048	0.24374	0.15917	0.02533	0.33500	0.05332	0.11222	0.05941
19	40.0	0.59570	-0.099160	3.68888	-0.36579	13.60783	-0.22599	0.12683	0.51584	0.26609	0.42258	0.21799	0.17858	0.01608
20	53.2	0.62760	-0.012288	3.97331	-0.04883	15.78716	-0.06291	0.05062	0.80027	0.64043	0.50945	0.40770	0.25954	0.00256
21	57.0	0.67950	0.129161	4.04305	0.52220	16.34626	-0.02292	0.15208	0.87001	0.75693	0.65090	0.56629	0.42367	0.02313
22	77.0	0.69150	0.162147	4.34381	0.70434	18.86865	0.14951	0.01263	1.17077	1.37070	0.68389	0.80068	0.46770	0.00016
23	98.0	0.72340	0.250901	4.58497	1.15037	21.02193	0.28778	-0.03688	1.41193	1.99355	0.77264	1.09092	0.59698	0.00510
24	122.0	0.75530	0.341973	4.80402	1.64285	23.07862	0.41338	-0.07140	1.63098	2.66011	0.86371	1.40871	0.74600	0.00136
25	169.5	0.78720	0.436578	5.13285	2.24089	26.34618	0.60191	-0.16533	1.95982	3.84088	0.95832	1.87813	0.91838	0.02733
26	177.0	0.81910	0.536383	5.17615	2.77640	26.79253	0.62673	-0.09035	2.00311	4.01246	1.05812	2.11954	1.11963	0.00816
27	216.0	0.85100	0.643857	5.37528	3.46091	28.89362	0.74090	-0.09705	2.20224	4.84987	1.16660	2.56693	1.35862	0.00942
28	348.0	0.88280	0.762614	5.85220	4.46297	34.24827	1.01435	-0.25173	2.67917	7.17793	1.28436	3.44100	1.64957	0.06337
29	565.8	0.91470	0.900804	6.33815	5.70943	40.17217	1.29296	-0.39216	3.16512	10.01796	1.42255	4.50252	2.02364	0.15379
30	615.0	0.94650	1.074345	6.42162	6.89904	41.23723	1.34082	-0.26648	3.24859	10.55331	1.59609	5.18502	2.54749	0.07101
31	624.0	0.97790	1.338201	6.43615	8.61286	41.42403	1.34915	-0.01095	3.26311	10.64791	1.85994	6.06920	3.45939	0.00012
SUMA					12,940682	424,194403	-16,173996	0,000000	0,000000	112,081355	0,000000	64,261368	39,534506	2,690524
			Y <sub>media</sub>	X <sub>media</sub>										
			-0.521742	3.173037										
					AJUSTE	0,000000								
PENDIENTE					0,57335									
INTERCEPTO					-2,34099									
					Se	0,30459								
					r <sup>2</sup>	0,93194	CUMPLE	La alineación cumple bien con las pruebas de ajuste (0), coeficiente de determinación (mayor a 0.9025) y coeficiente de correlación (mayor a 0.95)						
					r	0,96537	CUMPLE							
Parámetro de forma beta β = pendiente = b					0,57335									
Parámetro de escala η					59,32499									
MTTR (Tiempo medio de reparaciones)					94,9605									

**ANEXO O. Fiabilidad en función del tiempo y número de fallas de la bomba P-1501A**

<b>Falla</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Fall/Susp</b>	<b>F(t)</b>	<b>% F(t)</b>
1	224,00	F	0,0223	2,23%
2	258,00	F	0,0541	5,41%
3	259,00	F	0,0860	8,60%
4	309,00	F	0,1178	11,78%
5	326,00	F	0,1497	14,97%
6	413,00	F	0,1815	18,15%
7	456,00	F	0,2134	21,34%
8	476,00	F	0,2452	24,52%
9	486,67	F	0,2771	27,71%
10	491,50	F	0,3089	30,89%
11	693,00	F	0,3408	34,08%
12	748,50	F	0,3726	37,26%
13	861,08	F	0,4045	40,45%
14	892,50	F	0,4363	43,63%
15	930,00	F	0,4682	46,82%
16	974,00	F	0,5000	50,00%
17	983,50	F	0,5318	53,18%



18	997,50	F	0,5637	56,37%
19	1.036,00	F	0,5955	59,55%
20	1.192,00	F	0,6274	62,74%
21	1.321,00	F	0,6592	65,92%
22	1.382,50	F	0,6911	69,11%
23	1.487,00	F	0,7229	72,29%
24	1.601,50	F	0,7548	75,48%
25	1.702,50	F	0,7866	78,66%
26	1.908,58	F	0,8185	81,85%
27	2.677,00	F	0,8503	85,03%
28	2.940,00	F	0,8822	88,22%
29	3.144,00	F	0,9140	91,40%
30	3.291,00	F	0,9459	94,59%
31	3.663,50	F	0,9777	97,77%

**ANEXO P. Fiabilidad en función del tiempo y número de fallas de la bomba P-1501B**

<b>Falla</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Fall/Susp</b>	<b>F(t)</b>	<b>% F(t)</b>
1	167,00	F	0,0216	2,16%
2	182,50	F	0,0525	5,25%
3	314,58	F	0,0833	8,33%
4	409,00	F	0,1142	11,42%
5	420,50	F	0,1451	14,51%
6	522,00	F	0,1759	17,59%
7	672,00	F	0,2068	20,68%
8	676,00	F	0,2377	23,77%
9	689,00	F	0,2685	26,85%
10	736,00	F	0,2994	29,94%
11	749,00	F	0,3302	33,02%
12	776,75	F	0,3611	36,11%
13	864,00	F	0,3920	39,20%
14	883,75	F	0,4228	42,28%
15	957,50	F	0,4537	45,37%
16	1.128,50	F	0,4846	48,46%
17	1.207,50	F	0,5154	51,54%

18	1.240,00	F	0,5463	54,63%
19	1.397,50	F	0,5772	57,72%
20	1.558,00	F	0,6080	60,80%
21	1.625,58	F	0,6389	63,89%
22	1.627,00	F	0,6698	66,98%
23	1.680,00	F	0,7006	70,06%
24	2.060,00	F	0,7315	73,15%
25	2.102,50	F	0,7623	76,23%
26	2.127,50	F	0,7932	79,32%
27	2.155,50	F	0,8241	82,41%
28	2.198,00	F	0,8549	85,49%
29	2.567,00	F	0,8858	88,58%
30	3.058,00	F	0,9167	91,67%
31	3.061,50	F	0,9475	94,75%
32	3.306,50	F	0,9784	97,84%

**ANEXO Q. Fiabilidad en función del tiempo y número de fallas de la bomba P-1501C**

<b>Falla</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Fall/Susp</b>	<b>F(t)</b>	<b>% F(t)</b>
1	43,00	F	0,0287	2,87%
2	69,00	F	0,0697	6,97%
3	138,00	F	0,1107	11,07%
4	143,00	F	0,1516	15,16%
5	165,00	F	0,1926	19,26%
6	185,00	F	0,2336	23,36%
7	190,00	F	0,2746	27,46%
8	194,00	F	0,3156	31,56%
9	212,50	F	0,3566	35,66%
10	216,50	F	0,3975	39,75%
11	228,00	F	0,4385	43,85%
12	331,00	F	0,4795	47,95%
13	360,50	F	0,5205	52,05%
14	382,10	F	0,5615	56,15%
15	458,50	F	0,6025	60,25%
16	689,00	F	0,6434	64,34%
17	691,50	F	0,6844	68,44%

18	740,00	F	0,7254	72,54%
19	835,00	F	0,7664	76,64%
20	914,00	F	0,8074	80,74%
21	952,00	F	0,8484	84,84%
22	1.083,00	F	0,8893	88,93%
23	2.636,00	F	0,9303	93,03%
24	3.186,00	F	0,9713	97,13%

**ANEXO R. Fiabilidad en función del tiempo y número de fallas de la bomba P-1501D**

Falla	Tiempo	Fall/Susp	F(t)	% F(t)
1	69,00	F	0,0299	2,99%
2	109,50	F	0,0726	7,26%
3	119,00	F	0,1154	11,54%
4	190,00	F	0,1581	15,81%
5	191,00	F	0,2009	20,09%
6	193,50	F	0,2436	24,36%
7	214,50	F	0,2863	28,63%
8	264,00	F	0,3291	32,91%
9	281,00	F	0,3718	37,18%
10	305,00	F	0,4145	41,45%
11	329,50	F	0,4573	45,73%
12	386,50	F	0,5000	50,00%

13	455,00	F	0,5427	54,27%
14	457,00	F	0,5855	58,55%
15	740,00	F	0,6282	62,82%
16	861,00	F	0,6709	67,09%
17	1.038,00	F	0,7137	71,37%
18	1.289,00	F	0,7564	75,64%
19	1.394,50	F	0,7991	79,91%
20	3.500,00	F	0,8419	84,19%
21	3.999,00	F	0,8846	88,46%
22	4.588,50	F	0,9274	92,74%
23	9.253,00	F	0,9701	97,01%

**ANEXO S. Fiabilidad en función del tiempo y número de fallas de la bomba P-1501E**

<b>Falla</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Fall/Susp</b>	<b>F(t)</b>	<b>% F(t)</b>
1	39,00	F	0,0223	2,23%
2	60,00	F	0,0541	5,41%
3	110,00	F	0,0860	8,60%
4	112,00	F	0,1178	11,78%
5	141,00	F	0,1497	14,97%
6	256,00	F	0,1815	18,15%
7	335,00	F	0,2134	21,34%
8	379,00	F	0,2452	24,52%
9	400,83	F	0,2771	27,71%
10	432,50	F	0,3089	30,89%
11	435,33	F	0,3408	34,08%
12	566,00	F	0,3726	37,26%
13	679,00	F	0,4045	40,45%
14	748,25	F	0,4363	43,63%
15	838,00	F	0,4682	46,82%
16	841,58	F	0,5000	50,00%
17	952,58	F	0,5318	53,18%



18	1.021,67	F	0,5637	56,37%
19	1.105,08	F	0,5955	59,55%
20	1.149,00	F	0,6274	62,74%
21	1.315,25	F	0,6592	65,92%
22	1.389,00	F	0,6911	69,11%
23	1.421,00	F	0,7229	72,29%
24	1.879,50	F	0,7548	75,48%
25	2.033,00	F	0,7866	78,66%
26	2.105,00	F	0,8185	81,85%
27	2.211,50	F	0,8503	85,03%
28	2.232,00	F	0,8822	88,22%
29	3.135,00	F	0,9140	91,40%
30	5.156,00	F	0,9459	94,59%
31	6.831,00	F	0,9777	97,77%